This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

3 3433 06637965 6

3-VIP
GAGES

TRAITÉ

DE

MÉTALLURGIE DU FER

Tous droits de traduction et de reproduction réservés.

TRAITÉ

DE

MÉTALLURGIE DU FER

TOME PREMIER

ÉLABORATION DES MÉTAUX

PAR

LÉON GAGES

Capitaine d'Artillerie,
Ancien élève de l'École Polytechnique,
Ex-professeur à l'École d'application de l'Artillerie et du Génie.

Avec 187 gravures dans le texte

PARIS

LIBRAIRIE SCIENTIFIQUE ET INDUSTRIELLE

J. FRITSCH, ÉDITEUR

30, Rue Jacob, 30

1898

NEW YORK PUBLIC LIBRARY

THE NEW YORK
PUBLIC LIBRARY
ASTOR, LENOX AND
TILDEN FOUNDATIONS.
1898.

AVANT-PROPOS

Ce traité n'a pas pour but d'enseigner la pratique de la fabrication des métaux dérivés du fer dont le nombre s'accroît de jour en jour, ni de décrire les méthodes de travail spéciales aux usines de telle ou telle région.

En dehors des difficultés que présenterait forcément une pareille description, l'inutilité d'une étude de cet ordre apparaît clairement. Les dosages des matières destinées à réagir les unes sur les autres ou à subir un traitement approprié, la nature même de ces matières, varient souvent dans les usines selon la région où elles sont placées ou suivant les besoins industriels, essentiellement différents d'un jour à l'autre, auxquels elles doivent donner satisfaction.

Comme on le verra dans la suite, les variantes des méthodes générales de travail sont relativement peu nombreuses. L'écueil à éviter est d'aborder les descriptions de procédés particuliers n'ayant d'importance que pour les usines qui, placées dans des conditions spéciales, peuvent les exploiter.

Pour tirer de cette étude le plus grand profit, il est essentiel de *fixer les principes* sur lesquels reposent les méthodes générales de travail actuellement en usage, et de marquer *l'évolution* qui s'est produite depuis l'époque peu lointaine où l'élaboration des métaux ferreux, qui consistait surtout en un ensemble de recettes et de pratiques plus ou moins rationnelles, est devenue un *art chimique* ayant bénéficié largement des progrès de la science.

Nous nous efforcerons, par suite, de donner aux théories et à la description des procédés un grand caractère de *généralité*, persuadé qu'en opérant ainsi nous aurons appuyé sur une base sûre les connaissances nécessaires aux jeunes ingénieurs métallurgistes. Il est indispensable dans la publication d'un traité didactique de faire la plus petite part possible aux artifices de fabrication afin de permettre aux principes

généraux reconnus et sanctionnés par l'expérience de se dégager avec clarté.

Cet ouvrage comprend deux parties :

Dans la première, dont les matières constituent le tome I, nous nous occupons exclusivement des procédés *d'élaboration des métaux ferreux*.

Dans la seconde, dont les matières constituent le tome II, nous nous occuperons des procédés de *travail* de ces métaux.

Division générale du tome I : *Élaboration des métaux*.

Notions préliminaires	*Définitions. — Historique.* *Agents métallurgiques.*
Titre I. — Le Haut-Fourneau . . .	*Fabrication de la fonte.*
Titre II. — Le four à puddler. . . .	*Fabrication des fers et aciers puddlés.*
Titre III. — Le procédé Bessemer. . .	*Fabrication des fers et aciers fondus.*
Titre IV. — Le procédé Martin-Siemens.	*Fabrication des fers et aciers fondus.*
Titre V. — Le procédé de la cémentation.	*Aciers corroyés.* *Aciers fondus au creuset.*

Nice, 1er janvier 1898.

L. Gages.

NOTIONS PRÉLIMINAIRES

DÉFINITIONS — HISTORIQUE — AGENTS MÉTALLURGIQUES

Article 1er. — Définitions

La métallurgie est l'art d'extraire les métaux usuels de leurs minerais et de leur donner les formes sous lesquelles ils sont employés dans l'industrie, tout en leur faisant acquérir des propriétés déterminées.

La métallurgie du fer prend souvent le nom de *sidérurgie* (de σίδηρος fer, ἔργον travail).

De la définition qui précède découle la division de ce traité en deux parties :

1re partie (tome I). — Elaboration des métaux.
2e partie (tome II). — Travail des métaux.

Il ne sera donc question dans ce volume que de l'étude des procédés d'élaboration.

A. — *Rapports de la métallurgie et de la chimie.* — On apprend en chimie à préparer tous les métaux, usuels ou non, par des procédés plus ou moins compliqués, donnant ces métaux en quantité souvent peu appréciable et coûtant plus ou moins cher. Ces procédés de laboratoire sont pour la plupart inapplicables en grand, soit à cause des appareils délicats qu'ils exigent, soit parce qu'ils ne sont pas *rémunérateurs*.

Or, les opérations industrielles doivent être rémunératrices ; à la nécessité de faire de bons produits s'ajoute celle de les obtenir au plus bas prix possible. Et c'est cette question économique qui fait que la métallurgie ne saurait être considérée comme une branche de la chimie proprement dite : c'est à la chimie industrielle qu'elle ressortit, c'est-à-dire à l'art d'élaborer les différents produits en procurant des bénéfices. Le côté économique des procédés, qui n'intéresse pas le chimiste de laboratoire, doit être étudié de très près par l'industriel sous peine de

courir à la ruine. Il en résulte que le nombre des procédés de production des métaux applicables industriellement, c'est-à-dire le nombre des procédés métallurgiques sera relativement restreint. Il est clair, d'autre part, qu'il est impossible de fixer à priori d'une façon définitive un choix de procédés ; les données du problème économique à résoudre variant avec les conditions locales, les distances qu'ont à parcourir, pour aboutir à l'usine, les diverses matières premières telles que minerais, combustibles, etc...

Sous un autre point de vue la métallurgie diffère, en outre, de la chimie de laboratoire.

Généralement le chimiste ne se propose que l'isolement du métal dans le plus grand état de pureté possible afin d'étudier le métal type, pour ainsi dire. Quand le métallurgiste a à fournir un des métaux ferreux, il ne cherche pas à réaliser soit un corps simple, *le fer*, soit un corps composé à proportion de constituants nettement définis, tel qu'un *carbure ou siliciure de fer*, etc., mais un métal se rapprochant plus ou moins du métal type, *le fer*, ou d'un de ses composés avec le carbone, le silicium, le manganèse, etc., *possédant surtout des propriétés déterminées de résistance* aux différents efforts (ténacité, malléabilité, etc...).

Ces restrictions étant faites, on peut dire que la chimie est la science avec laquelle la métallurgie a les plus grands rapports et sans le secours de laquelle elle serait impuissante à réaliser de véritables progrès.

La métallurgie relève aussi de la mécanique et de la physique, car ses produits ne sont presque jamais employés à l'état brut : ils doivent le plus souvent subir des changements de forme et des changements d'état.

B. *Métaux de la métallurgie du fer.* — Les métaux de la métallurgie du fer se divisent en trois grandes classes dont la ligne de démarcation est bien difficile à préciser, ainsi qu'on s'en convaincra dans la suite. Ces trois classes sont constituées par :

Les fers ;
Les aciers ;
Les fontes.

Nous nous bornerons à en indiquer les principaux traits caractéristiques :

1° *Les fers.* — Le fer est un métal malléable à froid et surtout à chaud selon son degré de pureté : sa résistance à la rupture par traction est très forte et supérieure à celle de tous les métaux usuels ; il s'use

assez facilement par le frottement, ce qu'on traduit en disant qu'il a peu de dureté.

La densité du fer varie de 7,6 à 7,78, les mauvais fers étant les moins lourds ; son coefficient de dilatation, supérieur à celui de l'acier, varie entre $0,0^{4}1205$ et $0,0^{4}14401$.

L'industrie ne le livre pas pur : il est accompagné de métalloïdes et métaux en proportions assez faibles, il est vrai, mais suffisantes pour modifier ses propriétés. Un des plus actifs parmi ces corps modificateurs est le *carbone*.

Ne considérons pour l'instant que le carbone comme corps étranger uni au fer : c'est lui qu'on rencontre en effet inévitablement et en proportion assez notable à l'origine des procédés sidérurgiques.

Le *fer doux* est celui qui se rapproche le plus de l'état de pureté ; à mesure que la proportion de carbone augmente, le fer devient plus fusible et plus résistant, il est plus élastique, mais la faculté d'allongement diminue, c'est du *fer dur*.

La proportion de carbone dans le fer peut s'élever jusqu'à 0,25 0/0 ; mais ce caractère chimique n'est pas suffisant, comme on le verra, pour le distinguer des aciers qui sont généralement des métaux plus riches en carbone, puisque certains aciers dits extra-doux en contiennent une moindre proportion.

Il est généralement sous-entendu dans le langage industriel que *le fer* provient d'une méthode d'élaboration le produisant *à l'état pâteux* et en *petite masse*. Le forgeage a donné ensuite à ce produit la compacité, en expulsant de la masse semi-fluide contenant englobés les grumeaux de fer, les impuretés qu'elle contient. Quand le fer provient d'une méthode d'élaboration le produisant à l'état liquide, on lui réserve souvent le nom de *fer fondu*, de *fer homogène* ou *d'acier extra-doux*.

A partir de 4/1000 de carbone environ, une propriété nouvelle apparaît dans le fer, celle de prendre *la trempe*.

La trempe, dont l'étude ressortit au « Travail des métaux », est une opération qui consiste à refroidir un métal porté à haute température par immersion dans un liquide de nature variable ou même dans un bain métallique à point de fusion relativement peu élevé.

La trempe donne au fer à partir de la teneur en carbone fixée ci-dessus des propriétés caractéristiques sur lesquelles nous ne pouvons nous étendre. L'apparition de ces propriétés nouvelles peut servir à définir *l'acier*.

Il n'est cependant pas exact d'affirmer que les fers et aciers extra-doux ne trempent pas ; ces métaux acquièrent par cette opération calorifique une série de propriétés d'un ordre bien différent des premières et mises en évidence depuis quelques années seulement. Nous négligerons à dessein de les signaler, nous contentant de ne considérer comme métal trempé, selon l'idée généralement admise, que celui dont la résistance à la rupture par traction et l'élasticité notamment se sont considérablement accrues.

C'est à la théorie de la trempe (2e partie, tome II) qu'il y a lieu de se reporter pour compléter ces notions forcément très sommaires.

2° *Les aciers.* — Les aciers sont constitués par la série des métaux dont les teneurs en carbone peuvent varier de 4 à 5/1000 de carbone à 1,5 0/0. Cette dernière teneur représente à peu près la limite supérieure de la quantité de carbone que peuvent contenir les aciers pour être d'un usage courant, c'est-à-dire pour pouvoir sans danger supporter les divers traitements calorifiques ou mécaniques. Au delà de cette teneur, leurs propriétés ne varient plus d'une manière progressive ; la fusibilité seule continue à augmenter, tandis que la résistance qui n'avait cessé de croître avec la teneur en carbone subit une chute brusque. Quant à la malléabilité, elle devient à peu près nulle.

De 1,5 à 2 ou 2,5 0/0 de carbone, on a des métaux durs mais cassants, dont la résistance est très inégale et qui constituent les *aciers sauvages* peu susceptibles d'applications.

On dit qu'un acier est d'autant plus doux qu'il est moins carburé, ceux qui sont très carburés prennent le nom d'*aciers durs* ou *extra-durs*

Ces métaux sont obtenus à l'état liquide et en grandes masses si on le désire, à la restriction près que nous signalerons ultérieurement.

On ne savait fondre autrefois que des aciers proprement dits, c'est-à-dire des métaux prenant la trempe ; or, des procédés nouveaux ont permis de produire, à l'état de fusion, des aciers de plus en plus doux qui, à l'extrême limite de la douceur, ont toutes les propriétés du fer obtenu à l'état pâteux, ayant toutefois l'avantage sur lui de posséder une structure homogène, conséquence naturelle de la fusion.

C'est à ce métal appelé aussi *acier extra-doux*, puisqu'il est à l'extrémité de l'échelle des aciers doux, qu'on a donné les noms de *fer foudu* ou de *fer homogène* que nous avons cités plus haut.

Il y a lieu de signaler cependant que, comme le fer, certaines nuances d'acier peuvent être obtenues à l'état pâteux et en petite masse dans

le même appareil d'élaboration (four à puddler). Mais l'amplitude des nuances que l'on peut obtenir ainsi est très limitée : nous verrons dans la suite quelle a été l'importance de ce procédé et quelle en est la valeur actuelle.

S'il est vrai que la présence du carbone dans le fer modifie profondément ses qualités et engendre toute une série de métaux spéciaux, il n'est pas moins acquis aujourd'hui que d'autres corps tels que le *manganèse*, le *silicium*, le *chrome*, le *nickel*, etc... modifient chacun à leur manière les propriétés des aciers et souvent d'une façon très active. La présence de ces corps dans le fer, augmentant encore la variété des métaux de sa métallurgie, dépend plutôt du mode de fabrication que de la nature du minerai que l'on a traité. Si quelques-uns d'entre eux s'y trouvent parce que dans les manipulations successives de la matière première on *n'a pu ou voulu* les éliminer, d'autres au contraire y ont été ajoutés à dessein dans un but qui sera expliqué plus tard.

Nous avons dit que quelques-uns de ces corps se trouvaient dans les aciers parce qu'on n'avait pu ou voulu les éliminer ; les uns sont donc *nuisibles*, les autres *utiles*.

Parmi les corps nuisibles, il faut citer surtout le soufre et le phosphore.

3° *Les fontes*. — Au delà de 2,5 0/0 de carbone, on arrive à la fonte de fer qui a des propriétés bien différentes de celles des métaux précédents. La malléabilité est nulle, la résistance faible ; tandis qu'une température de 1500 à 1600° est nécessaire pour amener le fer doux à l'état de fusion ; pour la fonte elle s'abaisse à 1200° environ.

Le fer, et nous sous-entendons toujours que ce métal provient d'une méthode d'élaboration le produisant à l'état pâteux, possède la précieuse qualité de pouvoir se souder à lui-même entre 1300 et 1400° sans interposition d'aucun corps étranger, grâce au reliquat des matières étrangères toujours interposées entre les grumeaux de fer. Pour les fers fondus, la soudabilité est bien moindre.

Tandis que le fer se soude et se forge, que les aciers se forgent et prennent la trempe, la fonte ne peut généralement pas se souder ni se forger, mais se moule facilement et plus ou moins bien selon sa qualité.

La teneur de 6 0/0 correspondant à peu près à la formule Fe^3C paraît être la teneur maxima en carbone qui peut se combiner au fer.

Comme dans les aciers, on trouve concurremment avec le carbone d'autres corps associés au fer : manganèse, silicium, chrome, etc..., soufre, phosphore ; les uns *utiles*, les autres *nuisibles*.

Les proportions de ces corps dans les aciers y sont, en général, assez faibles (sauf toutefois pour certains d'entre eux, le manganèse et le nickel notamment); elles peuvent être très fortes dans les fontes. Certaines fontes ont une richesse en manganèse atteignant 80 à 85 0/0, d'autres ont 40 0/0 et même plus de chrome, d'autres 17 à 18 0/0 de silicium, etc...

4° *Corps nuisibles dans les fers, les aciers et les fontes.* — Nous avons dit que le soufre et le phosphore étaient des corps nuisibles.

a) **Fer et soufre.** — Le soufre se combine probablement avec le fer en toutes proportions; jusqu'à 53,3 0/0 il est facilement absorbé d'où qu'il vienne. On peut cependant empêcher sa combinaison avec le fer et même l'en expulser dans une certaine mesure, ainsi qu'il sera dit à l'exposé des procédés de désulfuration.

Le fer qui contient du soufre se travaille bien à froid, mais à chaud il se crique très facilement; s'il en renferme plus de 0,15 0/0 il se forge et se soude mal (*fer rouverin*); avec une proportion de 0,3 0/0 la soudure devient très difficile.

On prétend que le soufre rend le fer un peu plus ductile et plus doux à froid; ces qualités fort contestables ne sauraient compenser les inconvénients dûs à sa présence dans le travail à chaud.

Ces diverses influences sont, en général, d'autant plus sensibles que le métal est plus carburé. Il en résulte que le soufre sera très nuisible dans les aciers.

Voyons comment ce corps modifie les propriétés de la fonte :

Il en abaisse le point de fusion, mais il la rend plus épaisse, plus pâteuse quand elle est fondue et donne lieu à des soufflures, c'est-à-dire à des petites cloches ou ampoules remplies de gaz et interposées dans le métal pendant la solidification. On croit généralement que le soufre rend la fonte dure et cassante; ce fait est loin d'être prouvé.

b) **Fer et phosphore.** — Le phosphore se combine probablement au fer en toutes proportions jusqu'à 26 0/0. Le fer l'enlève facilement aux phosphates et aux phospho-silicates acides, surtout aux températures élevées et dans un milieu réducteur. Il y a lieu heureusement d'ajouter qu'il l'abandonne assez aisément dans un milieu fortement oxydant au contact des bases.

Le phosphore à une teneur de 0,5 0/0 rend le fer cassant à froid : des secousses ou des vibrations, insignifiantes en apparence, peuvent

provoquer la rupture du fer phosphoreux, on dit qu'un pareil métal est traître.

Le fer qui contient du phosphore se travaille bien à chaud (fer tendre) et se soude bien ; il paraît cependant plus cassant sous le choc trop brusque des engins de forgeage.

La présence simultanée du soufre et du phosphore dans le fer le rend aigre et fait qu'il se comporte également mal à froid et à chaud.

A une teneur de 1/1000 de phosphore, l'acier ne peut supporter ni le forgeage, ni la trempe.

Dans la fonte, le phosphore augmente la fluidité et peut être utile dans celle destinée à confectionner certains moulages (d'ornement par exemple) où l'on ne cherche pas la résistance.

c) **Fer et autres corps nuisibles.** — L'arsenic comme le phosphore, même à petites doses, rend le fer cassant à froid et plastique à chaud.

Le cuivre qui se trouve dans quelques minerais rend le fer rouverin, il semble surtout qu'il agisse en l'empêchant de se souder : sa présence ne paraît pas nuisible dans les métaux fondus, il en sera question dans la 2e partie de ce traité lors de l'étude des aciers au cuivre.

Tel est l'aperçu général qu'il était indispensable de donner dès le début de ce traité, il n'a pas d'autre but que de définir sommairement les classes de métaux dont on va exposer la fabrication. Peu à peu, au fur et à mesure de l'étude des procédés d'élaboration, nous compléterons ces définitions qu'à dessein nous ne précisons pas davantage.

Article 2. — Historique

1° *Le fer.* — L'histoire du fer contient les faits les plus intéressants au point de vue de la science archéologique ; elle est intimement liée à celle de la civilisation. Son emploi paraît remonter à la plus haute antiquité.

Les découvertes archéologiques tendent à établir qu'à l'âge de pierre succéda l'âge de bronze, puis celui du fer. Cependant pour quelques érudits il est contestable que le bronze ait été connu avant le fer ; pourquoi, disent-ils, le fer, avec sa grande facilité d'oxydation dans la terre humide, ne se serait-il pas transformé en une masse soluble dont les traces ont disparu ? Ce qui semble donner quelque poids à cette manière de voir c'est que, dans ces dernières années, le nombre des dé-

couvertes d'objets anciens en fer s'est considérablement accru. On a même trouvé des armes et des outils en fer mêlés à des objets et à des ustensiles de pierre.

A l'époque de l'invasion romaine, il est certain que l'usage des armes de bronze avait depuis longtemps disparu de Europe. Celles dont se servirent les Gaulois et les Bretons contre les légions de César étaient en fer.

La conquête de la haute Italie soumit à la domination romaine tous les Celtes cisalpins; près de Bergame et de Brixia fleurit du temps des empereurs une importante industrie sidérurgique exercée par les Séquanais.

Dans la Gaule transalpine, vivaient une foule de peuplades de race celtique très habiles dans l'art de travailler le fer.

D'après Strabon, les Bituriges n'avaient comme rivaux dans la fabrication du fer que les Prétocoriens, habitants du Périgord actuel.

Il semble toutefois établi que c'est en Angleterre que l'on a trouvé les premières usines à fer romaines ou romano-celtiques.

La préparation du fer devait se faire jadis au *foyer d'affinage*, comme le montrent les vestiges de ces foyers et des scories *(silicates métalliques)* qu'on a rencontrées dans leur voisinage.

Ces foyers d'affinage se rencontrent encore près de Naples et en Corse; ils devaient consister en de simples trous creusés dans le sol entourés d'un mur bas en grès, ainsi qu'en témoignent les résidus calcinés et scorifiés qu'on a trouvés.

Le minerai était grillé et fondu en tas au contact du charbon de bois; le vent naturel auquel durent succéder les soufflets mécaniques devait activer la combustion. Sous l'action de cette fusion réductive et oxydante le minerai perdait son oxygène, un certain nombre de corps étrangers étaient brûlés et il restait une sorte de magma spongieux (aujourd'hui appelé *loupe* dont les pores étaient imbibés de composés fusibles appelés laitiers (*silicates terreux*) et contenant du fer à l'état de grumeaux.

Cette fabrication à l'aide de *foyers d'affinage* ou *bas-foyers*, dans laquelle la nature du produit obtenu ne devait que bien peu dépendre de la volonté de l'ouvrier, se maintint pendant de longs siècles. On la trouve chez les Belges, chez les Helvètes, en Suisse et en Carinthie où le fer est exploité de toute antiquité.

Modifiés, du reste, de diverses façons suivant les pays, les *bas-foyers*, puis plus tard les *moyens foyers* donnèrent lieu à autant de

manipulations différentes connues sous le nom de méthodes *suédoise*, *allemande*, *styrienne*, *corse*, *catalane*, *navarraise*, etc...

Dans toutes ces méthodes, on n'employait exclusivement que du minerai riche et du charbon de bois.

2° *L'acier.* — On ne connaît rien de précis sur l'origine de la fabrication de l'acier; c'est un art tout à fait nouveau au point de vue de la précision théorique.

L'acier sauvage ou acier de fonte est le plus anciennement connu.

Les Indiens dans l'antiquité excellèrent dans l'art de travailler l'acier; c'est de leurs usines que sortaient ces fameuses lames d'épée appelées encore lames *damassées*, non comme on le croit généralement parce qu'elles se faisaient à *Damas*, mais parce que c'est de cette ville que les Européens les tiraient avant la découverte du cap de Bonne-Espérance (Dictionnaire Larousse).

Il y a lieu de croire que les Egyptiens étaient initiés à la fabrication de l'acier pour qu'ils aient pu sculpter le granit. Les Grecs savaient aussi produire ce métal et avaient dû en apprendre l'élaboration dans leurs rapports avec l'Orient ou avec l'Egypte. Les Romains paraissent n'être venus que bien plus tard après eux au même degré de perfection dans cet art si précieux.

Pendant le moyen âge, si l'on en excepte l'Espagne dont les usines exploitées par les Maures jouissaient d'une grande célébrité, l'Europe tirait de l'Orient tout l'acier qui lui était nécessaire.

Au XIIe siècle, des usines à acier s'établissent en Europe, surtout en Angleterre: la France est loin d'égaler, au point de vue de la production de ce métal, l'importance des autres pays. Il faut arriver à la fin du XVIIe siècle ou au commencement du siècle suivant pour discerner dans les procédés de fabrication une certaine régularité.

3° *La fonte.* — Revenons au foyer d'affinage qui servait à élaborer le fer.

On reconnut à la longue que les produits obtenus se liquéfiaient mieux quand le four était plus élevé, parce que la surélévation de température y était plus continue. Aussi, vit-on apparaître des fourneaux de hauteur plus grande; on peut les considérer comme constituant l'origine du *haut-fourneau* moderne.

C'est au XVe siècle, suivant Karsten, que remonterait une découverte destinée à exercer une influence décisive sur la civilisation, la fusion du fer à l'état de carbure qui est la *Fonte*.

De la découverte fortuite de la fonte, datent la fabrication du fer à bon marché et sa vulgarisation.

Les foyers plus élevés qu'à l'origine, employés alors, permirent d'obtenir à volonté le fer ou la fonte.

Pour avoir de la fonte, il fallait mettre en contact avec du carbone, à haute température, le métal réduit; ce qui s'obtenait en augmentant la proportion du charbon relativement aux matières constituant l'apport en fer. Puis, il fallait soustraire la fonte à l'action oxydante du vent en la conservant pendant la durée de l'opération sous une couche de scories.

Pour avoir du fer, il fallait au contraire augmenter la charge du minerai relativement au charbon et laisser couler les scories pour que la loupe, en s'agglomérant dans le foyer, ne fût pas soustraite à l'action du vent.

La découverte des fondants, c'est-à-dire de corps d'addition qui, ajoutés au minerai, permettaient l'élimination des matières terreuses qu'il contenait en évitant le passage d'oxyde de fer dans les scories, constitua ensuite un progrès énorme dans la fabrication des fontes.

On était au XVIe siècle en possession de deux moyens de retirer le fer de son minerai :

1° *La méthode directe* ou méthode ancienne, catalane, etc... encore suivie en Afrique, aux Indes, etc...

2° *La méthode indirecte* consistant à obtenir de la fonte qu'on transforme ensuite en fer et qui devait être la méthode de l'avenir, malgré les tentatives souvent renouvelées depuis de se servir industriellement de la méthode directe.

En Allemagne, les connaissances métallurgiques font les plus grands progrès; on y rencontre les premiers auteurs qui aient écrit sur ces matières, soit pour expliquer les procédés en usage, soit pour les rattacher à un corps de doctrine. En tête figure J.-C. Agricola ; ses ouvrages au nombre de sept remontent à 1530 et constituent l'ensemble le plus remarquable de la science technique de son époque; ils étaient encore regardés jusqu'au siècle dernier comme des guides précieux.

L'histoire des procédés d'élaboration des métaux de la famille du fer devrait donc rationnellement se poursuivre par celle des progrès successifs réalisés dans la fabrication des fontes à partir de la fin du XVIe siècle.

Nous ne saurions entrer plus avant dans cette étude, car les perfec-

tionnements qui suivent sont trop intimement liés à l'origine des procédés actuels pour que nous songions à les exposer séparément.

Ils font partie intégrante de la genèse même de ces procédés ; aussi ne craindrons-nous pas de remonter dans la suite de ce travail à cette époque déjà ancienne où, sans être encore un art perfectionné, l'élaboration du fer, œuvre patiente d'efforts industriels, de secrets révélés et transmis, commençait toutefois à être l'objet d'applications plus rationnelles et moins routinières.

Article 3. — Agents métallurgiques

On désigne sous le nom d'agents métallurgiques les matières de natures diverses utilisées dans l'élaboration des métaux.

Ces matières forment les quatre classes suivantes :

I. — *Les minerais*, substances minérales constituant l'apport métallique.

II. — *Les combustibles*, agents calorifiques.

III. — *Les fondants*, matières qu'on mélange au minerai pour faciliter l'extraction du métal.

VI. — *Les matériaux réfractaires*, employés pour constituer le revêtement intérieur des fours ou autres appareils métallurgiques.

Nous ne nous occuperons tout d'abord que des *minerais* et des *combustibles ;* renvoyant pour l'étude des fondants à l'exposé de la réduction des minerais au haut-fourneau et pour celle des matériaux réfractaires à la description ultérieure des appareils métallurgiques qui en utilisent les diverses variétés.

I. — *Les minerais*

Nous distinguerons les minerais de fer proprement dits et les minerais spéciaux.

A. — *Minerais de fer proprement dits.* — Les minerais peuvent être classés et subdivisés de bien des manières. Nous donnons plus loin et pour mémoire une de leurs classifications.

D'une manière générale, la couleur des minerais de fer varie du foncé au clair en allant des oxydes aux sels. (Voir plus loin la classification).

B. — *Propriétés générales des minerais de fer.* — Les seuls minerais de fer couramment employés sont les minerais oxydés.

Les qualités des minerais, leur teneur, dépendent beaucoup de la nature ou de la proportion des gangues ou des matières étrangères qui peuvent y être mélangées.

a) *Richesse et pureté.* — Au point de vue industriel, on peut considérer comme riches les minerais contenant de 55 à 70 0/0 de fer; comme moyens ceux qui contiennent de 30 à 55 0/0 de fer. Quand la proportion de fer est inférieure à 30 0/0, ils sont dits pauvres, et au-dessous de 20 0/0 environ, ils ne peuvent plus être traités.

Les minerais purs sont ceux qui ne contiennent que peu ou point de soufre et de phosphore.

Le manganèse, qui accompagne souvent le fer, augmente la valeur des minerais : nous verrons dans la suite quel rôle important joue ce métal dans la métallurgie du fer.

Le tungstène, le chrome, etc... sont utiles quand on veut incorporer ces corps aux aciers, mais il faut alors rechercher des minerais spéciaux pour les avoir en quantité suffisante.

b) *Fusibilité et réductibilité.* — Les corps constituant la gangue du minerai sont le plus ordinairement la silice, l'argile, le carbonate de chaux. Suivant la plus ou moins grande proportion de l'un de ces trois corps, le minerai est dit siliceux, argileux ou calcaire. La gangue dans ce cas est dite simple.

La gangue est dite complexe quand plusieurs des corps précédents : silice, alumine ou carbonate de chaux s'y trouvent en quantités comparables.

Les gangues simples sont infusibles par elles-mêmes, les gangues complexes sont plus fusibles. En tous cas, pour en obtenir la fusion, l'usage de corps spéciaux d'addition est nécessaire.

Ces corps sont dits fondants.

On appelle doux les minerais qui se réduisent aisément ; ils comprennent les minerais poreux, à l'état fragmentaire, hydratés et surtout carbonatés, après qu'ils ont subi la calcination.

On appelle durs les minerais dont le fer est plus difficile à extraire ;

ils comprennent les minerais compacts, en gros morceaux, les siliciés, etc.....

C. — *Minerais spéciaux.* — On a souvent besoin en sidérurgie, pour des motifs que nous expliquerons plus tard, d'introduire à côté du fer dans les fontes ou dans les aciers des corps qui leur communiqueront des propriétés spéciales ou qui transformeront ces métaux en réactifs, *nécessaires ou utiles*, dans les procédés d'élaboration.

Ces corps sont le manganèse, le chrome, le nickel, le tungstène, etc...

Un certain nombre de minerais de fer contiennent ces corps en plus ou moins grande proportion, tout en étant principalement riches en fer. Quand les proportions sont renversées ou comparables ; c'est-à-dire quand les minerais sont plus riches en manganèse, chrome, etc... qu'en fer, ou à teneurs à peu près égales, ils prennent le nom de minerais spéciaux.

a) Minerais de manganèse. — Ces minerais sont très pauvres en fer et très riches en manganèse, ou contiennent à peu près parties égales de manganèse et de fer.

Le minerai de *Romanèche* peut être considéré comme un type de minerai riche en manganèse, il a comme apport métallique (abstraction faite de la gangue) 3 0/0 de fer et 42 0/0 de manganèse.

Les minerais de manganèse riches peuvent donner une fonte de plus de 20 0/0 de manganèse, les moyens donnent des fontes ne pouvant en contenir que 8 à 20 0/0.

Le minerai de *Carthagène* peut être considéré comme un type de minerai moyen ; il donne comme apport métallique (abstraction faite de la gangue) 20 0/0 de fer et 27 0/0 de manganèse, etc...

b) Minerais de chrome. — Le minerai de chrome ou *fer chromé* des minéralogistes n'est autre chose que du sesquioxyde de chrome associé à du protoxyde de fer. Si l'on fait abstraction des gangues, la formule chimique de ce minerai n'est autre que celle de l'oxyde magnétique (FeO,Fe^2O^3) dans laquelle Fe^2O^3 est remplacé par Cr^2O^3, soit FeO,Cr^2O^3 ou M^3O^4; M désignant la somme de l'apport métallique constitué par le fer et par le chrome.

Nous verrons dans la suite que ce minerai sert non seulement à être traité dans les appareils réducteurs pour céder le chrome à la fonte de fer, mais encore à constituer le revêtement de certains fours d'élaboration d'acier parce que, d'une part il est très réfractaire et que d'autre

part, il ne constitue pas un obstacle à l'élimination de certains corps dont la présence serait nuisible dans les aciers.

Le fer chromé se trouve en assez grande abondance en *Grèce* et dans les monts Oural.

c) Minerais de tungstène. — Le principal minerai de tungstène est le wolfram : c'est un tungstate double de manganèse et de fer qu'on exploite en France, près de Limoges.

Ce wolfram de Limoges contient :

FeO — 19,19
MnO — 4,48
MgO — 0,80
WO^3 — 76,20

d) Minerais de nickel. — Le principal minerai de nickel est l'hydrosilicate magnésien, dont on trouve des gisements abondants en Nouvelle-Calédonie.

Il faut citer également le minerai du Canada (province d'Ontario) ; il contient le nickel en association avec la pyrite de fer magnétique, accompagné de cuivre à l'état de chalcopyrite. Nous ne citons ces minerais que pour mémoire, car le nickel ne s'utilise généralement pas à l'état de fonte dans les divers procédés sidérurgiques, mais à l'état plus ou moins pur. La fabrication des fontes nickelifères est aujourd'hui abandonnée à cause de la difficulté qu'on éprouve à les débarrasser, dans le traitement ultérieur, du soufre qu'elles retiennent toujours en proportion plus ou moins grande.

e) Minerais de silicium. — Ces minerais, qui font partie des minerais de fer cités plus haut, sont caractérisés par ce fait qu'ils contiennent de la silice libre ; cette silice à l'état libre pouvant être réduite dans les appareils réducteurs, grâce à une haute température et en présence de certains corps favorisant cette réduction.

En résumé, concurremment avec les principaux minerais de fer s'emploient aussi des minerais spéciaux, véhicules de corps tels que le manganèse, le silicium, le chrome, le tungstène, etc... donnant aux métaux dérivés du fer des propriétés spéciales ou favorisant des réactions nécessaires pour obtenir ces métaux eux-mêmes.

D. — *Généralités sur le traitement préliminaire des minerais.* — Nous nous contenterons d'énumérer sommairement les principales opé-

rations préliminaires auxquelles sont soumis les minerais avant qu'on les réduise.

a) Lavage et cassage. — Les minerais à gangue argileuse sont souvent débourbés, c'est-à-dire débarrassés de la plus grande partie de l'argile qu'ils contiennent, en la délayant dans des appareils spéciaux.

Quand les minerais sont en trop gros morceaux, on les casse afin de faciliter plus tard leur réduction au haut-fourneau.

b) Grillage. — Les travaux de MM. les professeurs Jordan et Wedding ont mis en lumière les avantages résultant du grillage des minerais dans certains cas particuliers que nous examinerons lors de l'étude du haut-fourneau; car, en général, presque tous les minerais de fer subissent le traitement réducteur tels qu'ils sortent de la mine.

Pour griller les minerais on les chauffe lentement au rouge à température assez modérée et dans une atmosphère légèrement oxydante ; on les place en tas à cet effet dans des fours spéciaux chauffés à la houille ou au gaz. Ces fours sont du genre « fours à cuve » pour les minerais en morceaux ou en grains ou des fours en zig-zag pour les poussières.

Dans le cas où l'on veut exploiter des minerais sulfureux le grillage est avantageux car il élimine une partie du soufre. En général, le grillage a simplement pour but de changer la condition physique ou chimique du minerai.

Le grillage rend les minerais moins compacts, augmentant leur porosité et les rendant ainsi plus aptes à subir l'action réductrice des gaz au haut-fourneau. C'est surtout au point de vue des changements d'état chimique que cette opération est avantageuse ; ainsi qu'on l'expliquera en détail lors de l'étude de l'élaboration de la fonte. La chaleur agit en chassant l'eau d'hydratation des minerais, l'acide carbonique des carbonates et en modifiant le degré d'oxydation, ce qui peut procurer un oxyde plus économiquement réductible.

Enfin, le grillage a souvent pour but non plus de préparer un traitement ultérieur plus économique, mais de séparer l'oxyde de fer du minerai d'une gangue trop abondante ou trop riche en éléments nuisibles. Après un concassage réduisant le minerai en grains assez fins, on procède à un grillage conduit de telle sorte que l'oxyde ainsi produit soit magnétique. L'emploi d'aimants puissants, à l'aide de dispositifs que nous ne saurions décrire, permet d'opérer la séparation de l'oxyde de fer et de la gangue.

Classification des minerais de fer (pour mémoire).

OXYDES (SANS EAU DE COMBINAISON)			PEROXYDES (AVEC EAU DE COMBINAISON)		SELS (NATURELS OU ARTIF
Fe^3O^4 — MAGNETITE — Franklinite (*aux États-Unis et au Canada*)		Oxyde salin magnétique. Noir grisâtre. Très riche. Suède, rare en France. Mokta. — Ile d'Elbe. — Sibérie. Gangue presque toujours siliceuse. De 50 à 65 °/. de fer.	Constituent les 9/10 des minerais français. Les oxydes hydratés se distinguent des autres par leur poussière jaune. Ils sont moins riches. Leur teneur maxima, à l'état de pureté, serait de 60 °/. de fer; leur richesse moyenne est bien inférieure.		CARBONATES: *Cristallin ou spa* Blanc, mais rou à l'air humide. Cristaux rhomb ques *Carbonaté argil lithoïde.* — Se vant dans les t houillers.
Fe^2O^3 — PEROXYDE de ANHYDRE	OLIGISTE	Cristallise en lames brillantes. Poussière rouge, souvent mélangé à Fe^3O^4, dont il a la gangue. Riche. — Ile d'Elbe France.	Fe^2O^3, HO — Pyrrhosidérite ou Goëthite.	Brun noirâtre ou café au lait. Renferme du manganèse. Sert à faire les fontes miroitantes dans le pays de Siegen (Prusse).	SILICIES — Silicates naturels: Les basaltes nats et jas sont pas t bles. La chamoisit nat ferrugi pu être exp
	MICACÉ	Variété d'oligiste, à paillettes minces et à structure schisteuse. Bon minerai, malheureusement très friable.	$2Fe^2O^3$, 3HO — Hématite brune.	Mamelonné, à cassure fibreuse. La teneur varie entre 50 et 56 °/. de fer. Gangue presque toujours argileuse. Souvent sulfureuse. France, Espagne, Angleterre, Westphalie.	Silicates artificiels: Scories de fo d'appareil boration ou de l'acie stituent un rai très r plus ou moi Presque t riche en nèse.
	HÉMATITE ROUGE	Oxyde amorphe compact, de couleur variant du rouge au violet. Gangue argileuse; structure concrétionnée ou fibreuse.	pFe^2O^3, nHO	HÉMATITE JAUNE: Petits grains empâtés dans un ciment argilo-calcaire. De 25 à 35 °/. de fer. Phosphoreux. Est de la France.	DIVERS: 1° Phosphates e niures de fer (n lisables). 2° Résidu du grill pyrites de fe ployées pour la cation de l'aci furique. Se p sous forme de sières. Sulfure gloméré souv briquettes ave chaux.
	FER OXYDE ROUGE	Moins pur et moins riche que l'hématite. Plus phosphoreux. En France, dans l'Ardèche.		LIMONITE: Minerai impur de formation récente; à mélanger avec d'autres minerais. MINERAIS EN GRAINS: Les grains forment de véritables couches. Minerais alumineux. Souvent impurs.	

II. — *Les combustibles.*

A. — *Notions générales sur les combustibles.* — Avant d'abord l'étude des divers combustibles utilisés en métallurgie, il est indispensable de donner quelques définitions et d'exposer les propriétés générales de ces agents calorifiques.

1° *Qu'est-ce qu'un combustible?* On nomme combustibles les substa

ces susceptibles de se combiner avec l'oxygène en dégageant assez de chaleur pour que la combinaison une fois commencée en un point ne s'arrête plus et se propage progressivement dans toute la masse.

La combustion est donc l'union, à température élevée, d'un corps combustible avec l'oxygène de l'air.

Le carbone et l'hydrogène, pris isolément, ou combinés entre eux, développent beaucoup de chaleur en s'unissant à l'oxygène ; aussi détermine-t-on cette combinaison par la mise en feu des végétaux anciens ou modernes dont la partie essentielle est une matière hydrocarburée. C'est là le moyen économique le plus employé pour produire la chaleur.

Il importe toutefois de signaler l'utilisation d'autres combustibles tels que le silicium, le phosphore, etc... qui, par leur union avec l'oxygène, réalisent dans certaines conditions spéciales une grande quantité de chaleur. Mais ces combustibles ne sont pas des combustibles d'apport comme les précédents, ils ne sont pas placés au contact ou à part de la matière à échauffer, ils existent tout formés dans cette matière même, y jouant le rôle de corps étrangers. Quand ils s'unissent à l'oxygène, ils échauffent la masse dans toutes ses parties par leur combustion intermoléculaire. Il n'en sera question que dans l'étude des procédés métallurgiques où ils sont utilisés.

Nous ne considérerons par suite dans cette étude préliminaire que les combustibles qui doivent leur valeur à la présence du carbone et de l'hydrogène.

2° *Propriétés générales des combustibles.* — Les combustibles ne sont presque jamais purs ; les matières étrangères dont la présence diminue leur valeur sont les cendres. On peut admettre que la valeur commerciale d'un charbon diminue de 2 à 5 0/0 par chaque unité de teneur en cendres : c'est-à-dire que si le prix du charbon pur est p, celui du charbon à n 0/0 de cendres variera de $p\left(1 - \frac{2n}{100}\right)$ à $p\left(1 - \frac{5n}{100}\right)$

A partir de 30 0/0 de cendres environ, la valeur industrielle d'un combustible devient à peu près nulle.

Les combustibles sont dits crus lorsqu'ils contiennent beaucoup de cendres et que ces cendres sont inoffensives.

Les combustibles sont dits impurs lorsqu'ils renferment des éléments nuisibles à la qualité des métaux que l'on se propose d'isoler. C'est ainsi que les combustibles sulfureux ou phosphoreux nuisent à la qualité du fer et de l'acier. Les bois et le charbon de bois sont des combus-

tibles relativement purs, mais cette pureté n'est pas absolue car on y rencontre toujours au moins des traces de phosphates et de sulfates alcalins ou alcalino-terreux. Les tourbes renferment souvent du sulfure de fer ou du sulfate de chaux, et presque toujours aussi des phosphates de fer et de chaux. Les combustibles minéraux sont toujours plus ou moins sulfureux ; les phosphates y sont plus rares, et l'arsenic ne s'y rencontre que d'une façon exceptionnelle.

L'état de division influe aussi considérablement sur la valeur des combustibles. Les poussières, le menu brûlent plus difficilement que le même combustible simplement réduit en fragments de la grosseur du poing. Le menu se tasse et s'oppose au passage libre de l'air. De là l'obligation d'agglomérer ce menu, soit par pression, soit par traitement calorifique spécial, comme nous le verrons dans la suite, ou d'adopter des appareils particuliers de combustion.

B. — *Description des combustibles.* — Nous distinguerons deux classes de combustibles : les combustibles naturels et les combustibles artificiels.

1° *Les combustibles naturels* se divisent en deux classes : *a*) les combustibles modernes, dont la formation se continue de nos jours : bois et tourbes ; — *b*) les combustibles fossiles : lignites, houilles et anthracites.

2° *Les combustibles artificiels* sont ceux qu'on obtient en soumettant les combustibles naturels à certains traitements tels que la dessiccation ou la torréfaction, la carbonisation et l'agglomération. Nous citerons le charbon de bois et le coke métallurgique que nous étudierons avec quelques détails.

1° *Les combustibles naturels.* — Ils se subdivisent, comme on l'a dit ci-dessus, en combustibles modernes et combustibles fossiles. Nous n'en donnerons qu'une description très sommaire.

a) *Combustibles modernes.* — Le bois n'est pas employé pour les opérations métallurgiques proprement dites ; il sert tout au plus à pratiquer quelques allumages pour les mises en marche de certains foyers métallurgiques.

La tourbe, produit de la décomposition et de l'entassement des mousses dans certaines vallées ou plateaux humides, ne peut servir pour les opérations qui demandent une température élevée.

On ne l'emploie en métallurgie que faute d'autres combustibles et

jamais à l'état naturel. Il faut la dessécher et la façonner en briquettes. Quand on s'en sert, on cherche à obtenir par carbonisation incomplète des gaz combustibles qu'on brûlera dans des appareils spéciaux.

b) *Combustibles fossiles.* — Ces combustibles contiennent principalement, abstraction faite des cendres, du carbone et de l'hydrogène, avec un peu d'oxygène et d'azote. L'hydrogène s'y trouve à l'état de combinaisons mal connues et très variées : les produits de la distillation sont nombreux et divers.

Les houilles se subdivisant en houilles sèches ou flambantes, houilles grasses et houilles maigres et anthraciteuses, il y a en réalité dans cette classe cinq espèces de combustibles dont les propriétés générales vont en se modifiant d'une manière continue des lignites aux anthracites.

A mesure qu'on avance dans la série, les combustibles deviennent de plus en plus maigres, c'est-à-dire qu'ils contiennent moins de matières volatiles et donnent plus de carbone fixe à la distillation.

Les cendres des charbons fossiles se composent principalement de matières terreuses, surtout d'argile. On y trouve peu de phosphore, mais toujours plus ou moins de pyrite.

Les lignites, constitués par une substance charbonneuse, à cassure résinoïde et provenant de la décomposition de matières végétales dont on peut encore distinguer la structure, ont un emploi analogue à celui de la tourbe.

Ils valent cependant un peu mieux à cause de leur densité plus élevée.

Les houilles sèches ou flambantes sont dures, compactes, d'un brun noir, dégagent à la distillation beaucoup de gaz, mais ce gaz est peu éclairant. Elles conviennent par suite très bien pour le chauffage des fours dans lesquels la chaleur n'est pas produite par la combustion directe du charbon mais par celle de gaz combustibles provenant de sa distillation ou carbonisation incomplète.

Le résidu de la carbonisation donne un coke, conservant la forme du fragment, mais non aggloméré.

Les houilles grasses sont moins dures, souvent très noires et très brillantes, à cassure lamelleuse, dégagent un gaz très éclairant, elles gonflent et fondent au feu en donnant un coke bien aggloméré. Leur pouvoir calorifique (1) peut être très élevé. Comme ce charbon s'agglomère de lui-même, on peut en brûler le menu sur des grilles. Il y en

(1) Voir plus loin à l'*étude théorique de la combustion* la définition précise du *pouvoir calorifique* et de la *température de combustion*.

a de très nombreuses variétés se distinguant entre elles par leur richesse en matières volatiles, par leur pouvoir calorifique, par leur facilité plus ou moins grande d'agglomération.

Cette classe de combustibles pourra donner satisfaction aux besoins les plus variés : production de gaz d'éclairage ou de gaz à brûler dans les appareils métallurgiques, fabrication de coke à gaz et de coke métallurgique, chauffage direct des foyers, etc...

Les houilles sèches et anthraciteuses sont noires, souvent ternes, brûlent sans fumée et avec une flamme courte. Elles constituent de bons charbons de chauffage, mais pas en menu car elles ne collent pas. Le coke qu'elles produisent est très friable et ne peut être utilisé. En France on les emploie souvent à l'état de briquettes.

Les anthracites présentent à un plus haut degré les propriétés des houilles maigres. Ils ont une couleur noire ou grise.

Quand ils sont purs ils sont très durs et peuvent servir dans certains foyers métallurgiques où on les entasse sur une assez grande hauteur en fragments de dimensions régulières.

Il est nécessaire que l'air puisse aisément circuler dans les interstices afin d'entretenir la combustion ; car ils brûlent difficilement souvent sans flamme et sans fumée. Les morceaux isolés s'éteignent rapidement.

Les anthracites ne sont pas toujours durs et résistants ; cela peut provenir soit de la nature de leurs cendres et alors la cassure est plus ou moins schisteuse, soit de la dislocation qu'ils ont subie par le fait du soulèvement des roches encaissantes, pendant le cours des périodes géologiques.

Cet aperçu fort succinct sur cette classe de combustibles n'a d'autre but que d'en rappeler les principales propriétés, renvoyant pour plus de détails aux traités spéciaux. (*Traité de métallurgie du Dr Percy, Métallurgie de Gruner, Métallurgie générale de M. U. Le Verrier*, etc...)

Du pétrole. — Les premiers termes des hydrocarbures saturés (1) CH^4, C^2H^6, etc... jusqu'à C^4H^{10} sont gazeux à la température ordinaire. A partir du 5e terme C^5H^{12}, ils se présentent sous forme de liquides mobiles, insolubles dans l'eau et qu'on rencontre en grande quantité dans la nature. Par leur mélange, ils constituent les *huiles de pétrole ou pétrole brut.*

(1) On appelle *hydrocarbures saturés* les carbures d'hydrogène dont la formule chimique s'écrit : C^nH^{2n+2}.

En Europe, le prix du pétrole est beaucoup trop élevé pour les usages industriels: cependant, quelques essais de chauffage au pétrole ont été faits en France pour certains foyers métallurgiques; notamment au *Creusot* il y a quelques années.

En Amérique, le pétrole s'emploie beaucoup: dans la Pensylvanie, l'Ohio, l'Illinois et l'Indiana, le pétrole brut fait une concurrence souvent victorieuse au charbon de terre.

En Russie, le pétrole est fort employé, même pour le chauffage de certaines locomotives.

A Pittsburg, on dispose encore de quantités assez fortes de gaz naturel pour alimenter les verreries, les usines à fer et l'industrie métallurgique en général; au fur et à mesure qu'il diminue, le chauffage au pétrole prend sa place.

Le pétrole sert dans les usines métallurgiques à la production de la

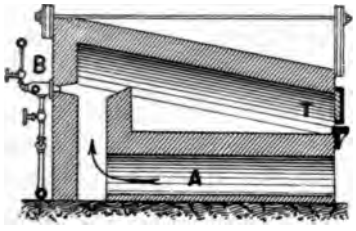


Fig. 1.

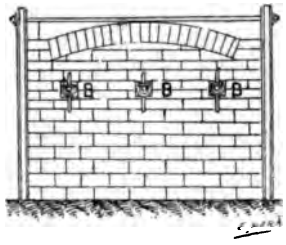


Fig. 2.

B, Becs Bunsen. — *T*, Porte de travail. — *A*, Conduite d'arrivée d'air.

vapeur, aux diverses fusions et au réchauffage des blocs de fer et d'acier destinés aux divers travaux de transformation à chaud tels que le laminage et le pilonnage, etc...

L'air et l'huile naturelle ou lourde sont introduits dans les foyers à température élevée par un bec Bunsen de très grande puissance dont la flamme est projetée dans la cavité de ces foyers.

Une méthode préférable consiste à faire arriver la flamme du bec Bunsen par le fond d'une grille mobile recouverte de fragments de briques réfractaires qui, sous l'action du feu, sont portées au rouge vif et donnent autant de chaleur que l'anthracite en combustion.

L'emploi d'un bec unique laisse souvent à désirer parce que le four n'est pas chauffé uniformément; ce qui présente un grand inconvénient

pour les fours à réchauffer les métaux qui doivent subir ultérieurement une transformation mécanique quelconque.

Le bec unique de très fort débit est remplacé par trois brûleurs analogues de petit calibre.

Chacun fonctionne indépendamment et au moment où on le désire.

Nous verrons dans la suite, lors de l'exposé des méthodes d'élaboration des métaux dérivés du fer, quelques dispositifs spéciaux de foyers à pétrole que nous étudierons avec quelques détails.

2° *Les combustibles artificiels.* — Les combustibles artificiels utilisés en métallurgie sont le *charbon de bois*, les *agglomérés* et *le coke*.

Nous ne donnerons qu'un aperçu général sur les propriétés et la fabrication du charbon de bois et des agglomérés, nous réservant d'exposer moins sommairement les divers procédés de fabrication du coke dont l'emploi est si important.

a) *Le charbon de bois.* — Le bois n'est guère employé en métallurgie qu'à l'état de charbon. La carbonisation, en éliminant toutes les matières volatiles, donne un combustible composé de carbone presque pur, ayant un pouvoir calorifique et une température de combustion très élevés.

La carbonisation se fait presque toujours en meules d'après les procédés connus; mais on a aussi construit des fours spéciaux en maçonnerie dans lesquels on obtient un rendement un peu meilleur et une économie de main d'œuvre. Ces avantages ne sont toutefois appréciables que si les fours peuvent être utilisés pendant une assez longue période pour en amortir les frais de construction : ils arrivent bientôt en effet à être trop éloignés des coupes qui se déplacent sans cesse dans la forêt, l'augmentation des frais de transport fait alors plus que compenser l'économie réalisée.

Le charbon de bois contient 3 à 4 0 0 de cendres; elles sont alcalines et il s'y trouve un peu de phosphates, mais pas de soufre. La faible proportion des cendres, leur fusibilité, l'absence du soufre, la présence des alcalis facilitant, ainsi qu'il sera dit plus tard, la fusion et l'épuration des matières, sont les causes de la supériorité de ce combustible pour certaines opérations métallurgiques.

b) *Les agglomérés.* — Les menus des houilles maigres, impropres à la fabrication du coke et doués d'un pouvoir calorifique considérable, sont ceux que l'on emploie d'ordinaire pour la fabrication des agglomérés. La substance qui sert de ciment pour réunir ces menus de

houilles maigres et qui, en même temps, n'augmente pas la teneur en cendres du combustible, est le brai sec ou gras.

La fabrication des agglomérés comprend la préparation de la pâte et la compression des briquettes.

La quantité de brai nécessaire varie d'ordinaire de 5 à 10 0/0, elle est fonction de la nature même des houilles. On a pu cependant faire des agglomérés en chauffant à 300 ou 400°, et sous pression, des houilles grasses : dans ce cas, les hydrocarbures fusibles à cette température constituent le ciment.

Le brai sec doit être préalablement broyé ; le brai gras est broyé ou fondu dans une chaudière.

Le charbon subit un essorage destiné à le dessécher avant ou après son mélange au brai.

Le brai et le charbon sont livrés ensuite en proportions déterminées par distributions automatiques aux appareils mélangeurs.

Pour pouvoir donner aux briquettes une cohésion suffisante dans toutes leurs parties, leurs dimensions ne doivent pas être exagérées. Dans le sens suivant lequel s'exerce la compression, l'épaisseur ne doit pas dépasser 10 à 12 centimètres : quant aux dimensions transversales, elles varient de 15 à 30 centimètres. Leur forme est le plus souvent celle d'un parallélipipède rectangle ; quelques machines donnent cependant des briquettes cylindriques.

La pression exercée varie de 100 à 250 atmosphères, suivant la nature du charbon et la proportion de brai.

Il existe un très grand nombre de machines à mouler les briquettes ; leur description n'offrirait qu'un intérêt trop éloigné.

Les agglomérés ont un excellent pouvoir calorifique, à cause des principes combustibles renfermés dans le brai qui entre dans leur constitution ; mais il sont d'un emploi assez rare en métallurgie car ils coûtent trop cher, aussi sont-ils surtout utilisés par la marine et les chemins de fer.

Quant aux briquettes de lignites et de tourbe, elles sont peu employées d'une manière générale : nous ne les citerons que pour mémoire, car elles ne sont d'aucun usage en métallurgie.

La tourbe n'est guère employée que dans des fours à gaz : il n'est pas alors nécessaire de l'agglomérer.

c) *Le coke.* — Toutes les houilles calcinées à l'abri de l'air donnent un résidu composé de carbone à peu près pur qu'on appelle

coke. Le coke a un pouvoir calorifique plus faible que la houille, car les matières volatiles éliminées par la calcination se composent en grande partie d'hydrocarbures combustibles. En outre, les cendres qui restent intactes se concentrent dans le résidu de la carbonisation, et celui-ci est moins pur que le combustible primitif. Il semblerait donc qu'il n'y ait pas avantage à carboniser la houille.

1° *De l'emploi du coke* (1).— Les houilles ne peuvent pas être employées dans les fours de grande hauteur dits fours à cuve (*hauts fourneaux et cubilots*) servant à produire la fonte ou à la refondre. Elles s'écrasent sous les poids des charges à traiter, s'opposent, en bouchant les interstices, au libre passage des gaz réducteurs et, quand elles sont grasses, se boursouflent et s'attachent aux parois.

La transformation des houilles en coke offre encore l'avantage d'éliminer une partie du soufre qui s'y trouve à l'état de pyrite, et qui peut produire des effets nuisibles dans la métallurgie du fer. Nous reviendrons plus loin sur ce point spécial.

Le coke entre donc pour une forte part dans le prix de revient de la fonte; le charbon de bois qui, au commencement du siècle, était encore d'un usage général en France, y a été presque complètement remplacé par le coke.

En Suède et en Autriche il n'en est cependant pas ainsi à cause de l'abondance du combustible végétal et de la nécessité de certaines fabrications spéciales qui justifient encore son emploi.

La fabrication du coke remonte à plusieurs siècles en Angleterre; en France, elle n'a guère commencé qu'il y a quatre-vingts ans.

La production a été constamment en croissant en Europe et l'augmentation a été rapide pendant les dernières années.

Le chauffage des locomotives a été en France, au début des chemins de fer, un débouché très important pour le coke : les cahiers des charges imposaient la fumivorité et l'emploi de combustible cru était complètement interdit. Dès 1854, l'emploi de la houille fut autorisé; à l'heure actuelle on n'emploie plus le coke que sur la ligne de ceinture de Paris, dans les longs tunnels et dans les tramways urbains.

Aux Etats-Unis, l'industrie du coke est relativement récente, mais

(1) Nous renvoyons pour l'étude complète du coke métallurgique et de ses procédés de fabrication au remarquable travail paru il y a quelques années dans le Bulletin de la Société de l'industrie minérale et dû à M. l'ingénieur Rossigneux. Il nous a été fort utile pour notre rédaction.

: s'y développe très rapidement. Jusqu'en 1874, la très grande majo-
é des hauts-fourneaux marchait à l'anthracite ; à la suite d'une grève
mines, on fut obligé d'avoir recours au coke. On mélangea d'abord
:oke à l'anthracite, puis on finit par s'en servir presque exclusivement
ns certaines régions. D'ici dix ans, l'Amérique produira plus de
ce que n'en produit actuellement l'Angleterre.

L'Australie possède un bassin important de houille grasse et ce pays
it être rangé au nombre des producteurs de coke.

Les bassins houillers de l'Extrême Orient sont encore peu connus et
ı développés : celui du Tonkin commence à donner lieu à une expor-
ion importante.

2° *Propriétés du coke métallurgique.* — Le coke métallurgique dif-
e du coke provenant des usines à gaz. Ce dernier sert surtout pour
chauffages domestiques et quelques chauffages industriels ; cepen-
ıt des essais faits aux hauts-fourneaux de Saint-Louis (Bouches-du-
ône) ont prouvé qu'on pouvait avantageusement l'employer en
lange avec le coke métallurgique dans la proportion de 30 0/0 et
me de 50 0/0 dans certains cas. Cet emploi ne s'est, du reste, pas
ıandu.

Le coke du gaz provient, comme on sait, de la distillation de la
uille en morceaux et n'est qu'un produit accessoire de la fabrication
gaz d'éclairage. Nous ne saurions en parler ici.

Le coke métallurgique doit être très dense et surtout d'une grande
sistance à l'écrasement. La résistance du coke est due à deux élé-
ents : 1° *la nature de la houille ;* les houilles sèches à longue flamme,
est-à-dire ayant plus de 40 0/0 de matières volatiles, ou les houilles
:op peu grasses en ayant moins de 19 0/0 ne sont guère susceptibles,
n général, de fournir un coke résistant ; le meilleur coke est donné
ıar les houilles contenant de 20 à 30 0/0 de matières volatiles ; 2° *le*
ıocédé de carbonisation ; la forme, les dimensions du four et sa tempé-
ature ont une grande influence et doivent être soigneusement étudiées
pour chaque nature de combustible.

Le coke est généralement d'autant plus résistant qu'il est plus dense,
au moins pour une même qualité de charbon. Une grande densité du
coke procure un autre avantage dans les hauts-fourneaux ; c'est de di-
minuer le volume de la charge et d'augmenter la capacité utile du
fourneau. Cependant, le coke employé dans les cubilots (*petits fours à*
ure employés pour refondre la fonte) ne doit pas être trop dur car il

demanderait trop de tirage, mais il doit être dense pour ne pas être écrasé par la fonte avec laquelle il est en contact ; il en est de même pour celui qu'on emploie dans les fonderies.

3° *Corps accompagnant le carbone dans le coke.* — Nous examinerons successivement la teneur en cendres, en soufre, en phosphore et en autres corps étrangers.

— Teneur en cendres. — Le coke métallurgique dit non lavé contient de 12 à 15 0 0 de cendres ; le coke lavé de 6 à 9 0 0. Ces expressions de coke lavé ou non lavé n'ont souvent qu'une valeur commerciale ; le charbon qui fournit le coke à 12 0 0 subit dans bien des cas un lavage au moins partiel, et, d'autre part, certaines usines peuvent fabriquer du coke à 8 0 0 de cendres avec du charbon tel qu'il sort du puits.

— Teneur en soufre. — Tous les cokes renferment une proportion plus ou moins élevée de soufre ; certains cokes n'en contiennent que 0,25 0 0, d'autres en contiennent jusqu'à 2,3 0 0.

Ainsi que nous l'avons dit plus haut, le coke contient généralement moins de soufre que la houille qui a servi à sa fabrication.

La pyrite se rencontre dans toutes les houilles, sous forme de lames minces intercalées entre les feuillets et surtout à l'état de FeS^2. Ce bisulfure se trouve sous deux formes de même composition chimique, mais de natures fort différentes : la pyrite cubique ou martiale, ou fer sulfuré jaune, dure, compacte, inaltérable à l'air et la pyrite blanche, dite marcassite, moins dense et altérable à l'air humide s'y transformant en sulfate.

Ces deux pyrites chauffées au contact du charbon peuvent se transformer plus ou moins complètement en FeS, perdant la moitié de leur soufre.

Il n'est pas démontré, en effet, que la transformation de FeS^2 en FeS soit intégrale, car on a constaté dans le coke la présence de pyrite magnétique attirable à l'aimant Fe^7S^8.

On a cru pendant longtemps que le soufre provenait entièrement de la pyrite de fer ; en réalité, le soufre combiné au fer ne forme qu'une fraction restreinte du soufre total. Il résulte de récentes analyses confirmées par les recherches de *MM. Berthelot* et *André* (1) au sujet de l'état du soufre dans les diverses parties des plantes à différents degrés de croissance que le soufre présent dans la houille y existe non seule-

(1) Communication à l'Académie des Sciences du 19 janvier 1891

ment à l'état de pyrite, mais aussi à l'état de combinaison organique avec le carbone, comme il l'est dans les matières animales et dans un grand nombre de matières végétales.

Il en résulte que certains procédés d'élimination du soufre basés sur l'action de certains gaz ou de la vapeur d'eau sur la pyrite n'ont pas grande valeur.

On admet qu'une nouvelle partie du soufre est éliminée pendant l'extinction du coke, pratiquée au moment de sa sortie des fours où il a été élaboré, par l'action de la vapeur d'eau à haute température donnant de l'oxyde de fer et de l'hydrogène sulfuré. Il est incontestable, en effet, qu'une certaine élimination de S se produit pendant l'extinction, reconnaissable, du reste, à l'odeur de l'hydrogène sulfuré produit; mais on a constaté bien souvent et par des mesures précises que ce départ de S était bien faible. Avec certains charbons, pourtant très sulfureux, l'odeur d'hydrogène sulfuré est à peine sensible.

— Teneur en phosphore. — La teneur en phosphore des houilles est très variable, ainsi qu'il résulte des expériences de *M. A. Carnot* au laboratoire de l'Ecole supérieure des Mines.

La teneur varie de 0,008 0/0 à 0,1 0/0.

Pratiquement la quantité de Ph contenue dans la houille d'une couche déterminée est sensiblement proportionnelle à sa teneur en cendres: le phosphore est à l'état de phosphate dans les cendres et se conserve intégralement dans les cendres du coke; il n'y a aucune élimination pendant la carbonisation.

— Teneur en autres corps. — Le soufre et le phosphore sont les deux éléments principaux pouvant exercer sur la qualité des métaux de la famille du fer une action nuisible.

Quant aux autres corps tels que le plomb, le cuivre et l'arsenic, etc..., les nombres trouvés aux analyses prouvent qu'heureusement ils n'existent qu'à l'état de traces et que leur influence est tout à fait insignifiante à côté de celle du soufre et du phosphore.

Pour ce qui concerne l'arsenic notamment, on estime qu'il ne peut en rester dans le coke à l'état appréciable, car selon toute apparence, ce métalloïde se trouve dans la pyrite à l'état d'arsenio-sulfure ou de mispickel. Or, ce minéral calciné à l'abri de l'air perd son arsenic qui se sublime à l'état de sulfure. La plus grande partie de l'arsenic doit donc se volatiliser pendant la carbonisation.

4° *Préparation du charbon avant la carbonisation.* — Avant d'être

introduit dans les fours où doit se produire la carbonisation, le charbon doit être soumis à un broyage.

On avait commencé par fabriquer le coke avec de la houille en gros morceaux; mais le menu donne du coke aussi bon, parfois même supérieur : il vaut donc mieux réserver le gros qui a une très grande valeur pour le brûler comme charbon de forge.

Le broyage des charbons s'impose pour plusieurs raisons : on obtient d'abord par cette opération un coke plus homogène au point de vue chimique, car les morceaux d'une certaine grosseur peuvent renfermer des lits schisteux qui formeraient plus tard un plan de clivage dans le coke. En outre, la densité du coke se trouve augmentée, car sous l'action de la chaleur il se forme pendant la carbonisation avec le poussier de houille et par l'intermédiaire des gaz de la distillation une pâte grasse et collante sans solution de continuité.

La houille même en menus morceaux ne contient pas assez de poussier pour combler les vides; il y a toujours avantage à la broyer de façon à n'avoir pas de fragments de plus de un centimètre comme dimension moyenne.

Les broyeurs employés sont ordinairement des broyeurs *Carr*.

Enfin, il est fait usage de différents appareils spéciaux, soit pour mesurer mécaniquement la proportion des charbons de diverses natures employés, soit pour en constituer un mélange aussi intime que possible.

C. — *Fabrication du coke.* — La carbonisation en plein air et par un procédé analogue à celui qui se pratiquait pour le bois a été le premier moyen employé pour la fabrication du coke. Les tas avaient 1 à 2 mètres de hauteur, ils étaient circulaires ou rectangulaires et avaient une cheminée au centre communiquant avec des conduits ménagés à la base pour l'arrivée de l'air. La carbonisation durait plusieurs jours; quand elle était complète, on éteignait la masse par étouffement ou par aspersion d'eau.

Pour carboniser le menu, on remplaçait le procédé en tas par celui des stalles. On entassait le charbon entre 3 murs en réservant des carneaux pour la circulation de l'air au moyen de rondins en bois qu'on plaçait à différentes hauteurs et qu'on retirait après avoir tassé le charbon autour : puis on allumait et on laissait la combustion se propager lentement.

Ces procédés en tas ou en stalles entraînaient une main-d'œuvre

considérable et étaient d'un très faible rendement. C'était aux dépens du carbone fixe que se faisait le chauffage de la masse; une grande partie du charbon placé à la base des tas était convertie en cendres et le rendement, dans les meilleures conditions, ne dépassait pas 50 à 55 0/0.

La carbonisation en plein air a disparu en France vers 1855.

1° *Anciens fours à coke ou fours à boulanger.* — Le four à boulanger ne diffère du four à cuire le pain que par la présence au sommet de la voûte d'un orifice servant au chargement de la houille menue et à la sortie des flammes. La porte latérale formée d'un cadre en fer garni de briques sert à la sortie du coke et à l'introduction de l'air nécessaire à la combustion.

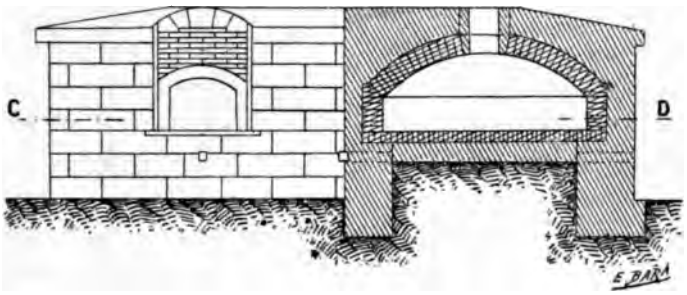


Fig. 3. — Four à coke, dit de Boulanger. — Elévation. — Coupe verticale *A B*.

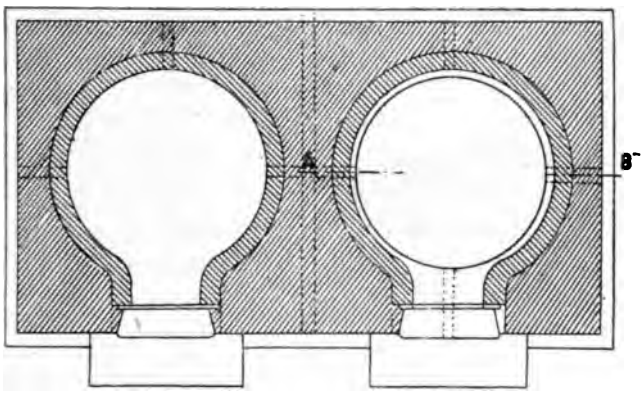


Fig. 4. — Four à coke, dit de boulanger. — Coupe horizontale *C D*.

Pour la mise en train, le four doit être séché et porté au rouge au moyen d'un feu allumé sur la sole, la porte restant ouverte pour l'arri-

vée de l'air. Quand le four est rouge, on ferme la porte et on charge la houille par la voûte. Pour les opérations suivantes, on fait le chargement aussitôt que le four est vide sans lui laisser le temps de se refroidir.

La houille commence à distiller dans la couche supérieure sous l'influence de la chaleur qui rayonne de la voûte ; les gaz de la distillation brûlent, grâce à l'air qui s'introduit par les fissures des parois. La chaleur se propageant peu à peu de haut en bas, la distillation continue sans grande consommation de coke, car l'air n'arrive qu'en petite quantité. L'opération est terminée quand l'atmosphère du four devient claire, parce qu'alors il ne se produit plus d'hydrocarbures. Il faut ensuite opérer l'extinction du coke qui peut se faire de deux façons : par étouffement dans le four même en bouchant hermétiquement toutes les issues ou par aspersion d'eau. Le coke est ensuite retiré à l'aide de crochets.

Il est presque impossible d'éviter la combustion d'une certaine quantité de coke, soit pendant l'opération, soit pendant le défournement qui est long et pénible ; de plus, la carbonisation s'opère fort irrégulièrement.

Aussi, ce système peu économique est-il presque complètement abandonné en France ; il est cependant encore employé dans les pays où la houille est à bon marché.

Il importe toutefois, avant de décrire les fours perfectionnés en usage aujourd'hui, de signaler les transformations d'ordres divers qu'on a essayé d'apporter aux fours à boulanger.

Nous citerons :

a) *Le four Maurice* dans lequel la porte est complètement fermée et qui est muni pour l'arrivée de l'air d'orifices placés sur toute la circonférence du four. Ces orifices pratiqués dans des briques spéciales sont disposés à une assez grande hauteur au-dessus de la charge et de façon que les filets d'air prennent, dès leur entrée dans le four, une direction ascendante en rasant la voûte.

b) *Le four Aitken* dans lequel on insuffle de l'air chaud ou froid par un tuyau en fonte régnant autour de l'extérieur du four et portant des tubulures rapprochées placées dans des briques de forme spéciale, subdivisant le courant en minces filets.

c) *Les fours Adam et Baum.* — Ces deux inventeurs par des dispositifs qui leur sont propres ont rendu mobile la sole du four à boulanger,

de façon à permettre un défournement plus facile et l'extinction du coke à l'air libre.

Quelle que soit la valeur de ces divers perfectionnements, il importe de ne pas oublier qu'un des avantages du four à boulanger est sa simplicité et son prix d'installation peu élevé ; si on le complique, on lui ôte toute sa raison d'être.

2° *Fours à parois chauffées.* — Ces fours ont généralement la forme d'un prisme rectangulaire.

On donne le nom de four belge à tous ceux dont la plus grande dimension est horizontale. Un four belge est une espèce de couloir voûté, fermé aux deux extrémités par des portes en fonte garnies de briques réfractaires qui ont la même largeur que le four : l'une d'elles sert à laisser sortir le gâteau de coke, l'autre au passage du repoussoir à vapeur qui opère le défournement.

Le charbon est chargé dans le four par des orifices ménagés dans la voûte et fermés par des plaques en fonte.

On dispose un certain nombre de ces fours à côté les uns des autres dans de longs massifs : les gaz en sortent par des ouvertures pratiquées dans les reins de la voûte et vont se brûler dans des carneaux ménagés entre deux fours contigus et au-dessous de la sole : toutes les parois se trouvent ainsi chauffées.

L'air destiné à la combustion est introduit par un trou de 2 à 3 cent. de diamètre pratiqué dans le haut de chaque porte.

Le coke sera moins exposé à brûler dans ces fours, car l'enveloppe de gaz dont ils sont entourés les protège de tous côtés, sauf toutefois sur les deux faces assez étroites où se trouvent les portes.

La contenance d'un four belge est d'environ trois à quatre tonnes de houille ; la durée de l'opération dépend de la largeur du four. Comme la distillation se propage en 24 heures sur une distance d'environ 0^m20 à partir de chaque paroi, la largeur sera de 0^m40 si on veut carboniser en 24 heures et de 0^m80 si on veut carboniser en 48 heures. Ces largeurs sont des largeurs moyennes ; car, en principe, les fours vont en s'évasant du côté de la sortie du coke pour faciliter le défournement.

C'est en Belgique, dès l'année 1842, que les fours à parois chauffées ont pris naissance. On vit successivement apparaître les fours de nombreux inventeurs (Brunfaut, Fromont, Dulait, Smet... etc...) se rapprochant tous plus ou moins du four Smet, dont la caractéristique est la disposition horizontale des carneaux de chauffage.

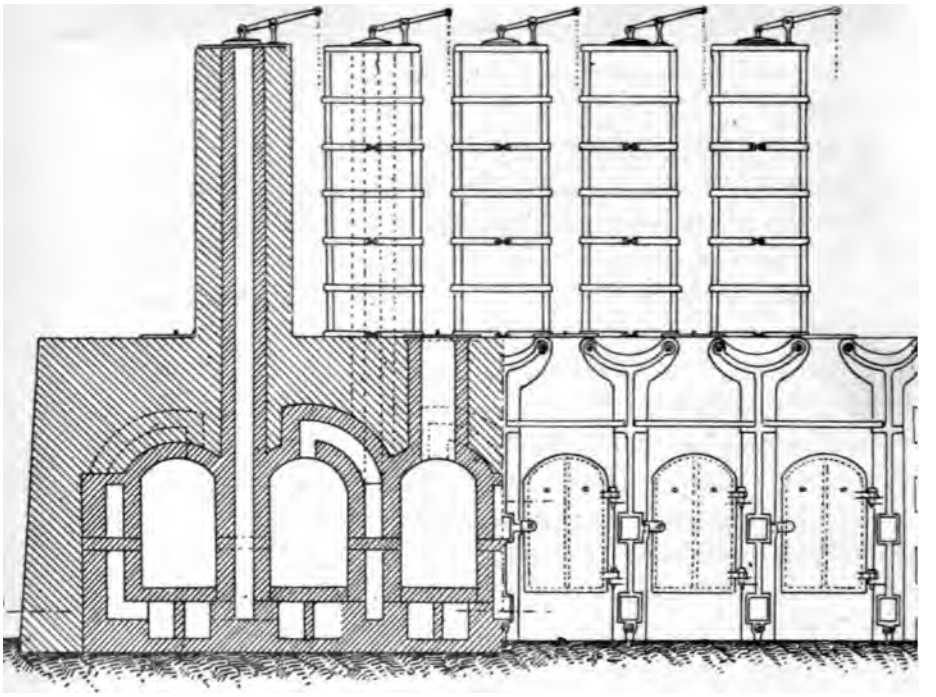


Fig. 5. — Four à coke, système Smet. — Elévation. — Coupe verticale *M N O P Q R*

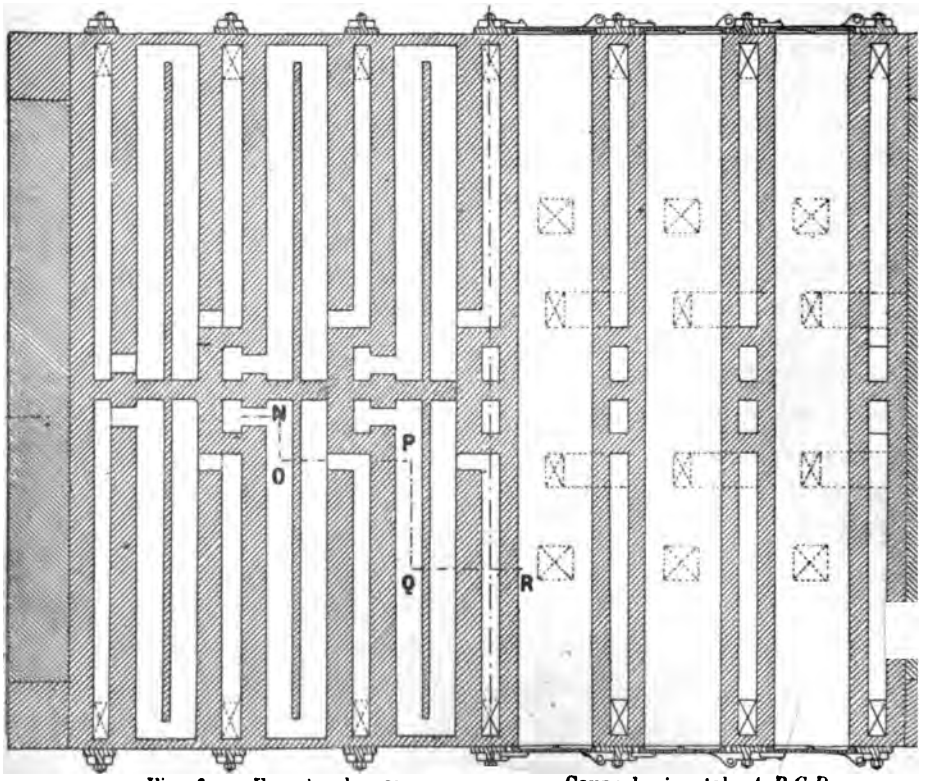


Fig. 6. — Four à coke, s· - Coupe horizontale *A B C D.*

Les fours Smet sont ordinairement groupés deux par deux pour le chauffage.

Les gaz sortent de la chambre de carbonisation par deux ouvertures situées au sommet de la voûte, et viennent en deux courants distincts chauffer d'abord une des parois verticales au moyen de deux carneaux horizontaux, puis la sole, au moyen de deux autres carneaux pour s'échapper ensuite par deux cheminées placées au milieu de la largeur du four. Les façades latérales d'un massif de fours sont soutenues par des armatures en fonte dans lesquelles on remarque des ouvertures rectangulaires destinées au nettoyage des espaces vides qui existent entre les parois de deux fours contigus.

Les fours Smet furent introduits en France, vers 1850.

Les fours Coppée, qui datent à peu près de la même époque, étaient à carneaux verticaux. M. Coppée n'est pas l'inventeur des fours à carneaux verticaux, mais ce type de fours a été perfectionné à différentes reprises par lui et par son fils, et à l'heure actuelle, on appelle communément fours Coppée tous les fours belges à carneaux verticaux.

De même, on réunit sous la dénomination de fours Smet tous les fours belges à carneaux horizontaux.

Considérons un des types de fours Coppée.

Les fours communiquent entre eux à la partie supérieure ; soit deux par deux, soit quatre par quatre et sont chargés par des ouvertures *C*.

Les figures 7 et 8 ci-après représentent des fours communiquant deux par deux.

L'air destiné à la combustion pénètre par des tubulures en fonte *A* munies de registres et au nombre de quatre pour chaque compartiment ; cet air s'échauffe en utilisant la chaleur perdue du massif dans des carneaux longitudinaux *D* et *E* ayant la longueur du four lui-même et séparés l'un de l'autre par des briques à claire-voie.

L'air pénètre ensuite dans les carneaux verticaux par 18 ouvertures pratiquées à la partie inférieure des carneaux *E*, et verticalement.

Une autre arrivée d'air supplémentaire se fait, en outre, par un trou de 2 cm. de diamètre pratiqué dans chacune des portes en fonte des extrémités. On évite ainsi, en partie, par cette disposition le contact direct d'une atmosphère oxydante avec la surface supérieure du chargement, et la quantité de coke brûlé n'est que de 2 à 3 0/0.

Les gaz qui distillent pénètrent dans les carneaux verticaux par 18

prises de flammes (voir fig. 8 ci-dessus), pratiquées à la naissance de la voûte surbaissée de chaque four. Ces 18 prises de flammes faisant face

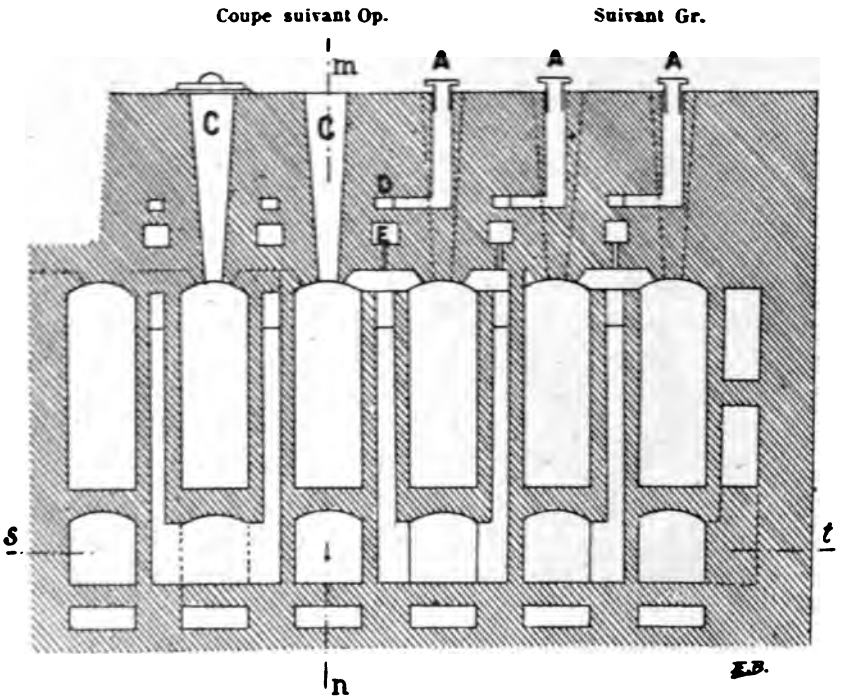


Fig. 7. — Four Coppée. — Coupe transversale suivant *op* et suivant *gr*.

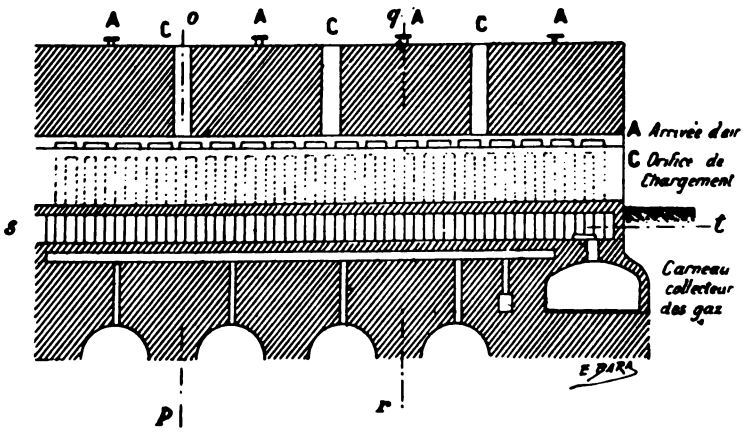


Fig. 8. — Four Coppée. — Coupe longitudinale suivant *m n*.

aux 18 ouvertures d'arrivée d'air placées au-dessous du carneau *E*

(fig. 7) se correspondent dans deux fours voisins, de sorte que les gaz d'un four peuvent se répandre dans l'autre. Le défournement se faisant en deux séries, celle des numéros impairs et celle des numéros pairs, il résulte de la disposition précédente que la houille fraîchement enfournée est de suite allumée à la surface par les flammes des fours voisins, ce qui contribue à maintenir une allure très chaude.

Dans chaque piédroit se trouvent 28 carneaux verticaux séparés les uns des autres par des cloisons verticales. Les flammes parcourent de haut en bas chacun des carneaux verticaux et se rendent ensuite sous les soles.

La figure 9 ci-jointe fait comprendre la répartition des courants gazeux. Les fours sont groupés deux par deux au point de vue de la

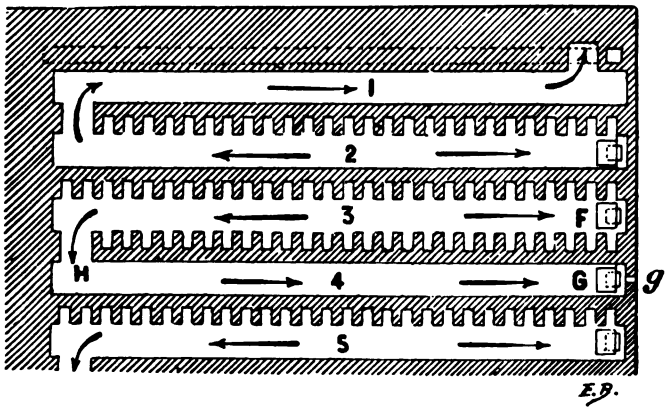


Fig. 9. — Four Coppée. — Coupe en plan suivant *s t*.

circulation des flammes dans les carneaux placés sous les soles. Prenons, par exemple, les fours 2 et 3 :

Le carneau de sole n° 3 reçoit tous les gaz parcourant les carneaux verticaux situés à droite et à gauche du four n° 3; une partie de ces gaz, un peu plus de la moitié, passe par la communication *H* et chauffe dans toute sa longueur la sole 4, puis va au carneau collecteur en traversant le registre *G* largement ouvert. Le reste des gaz s'échappe directement par le registre *F*. On règle l'ouverture de ces registres qui sont formés d'une dalle réfractaire, en les manœuvrant du dehors à l'aide d'un crochet par une ouverture telle que *g* qui est bouchée dès que le réglage est fait une fois pour toutes.

Le carneau collecteur est placé sous les fours ; on dispose en général d'une seule cheminée pour 20 fours.

Dans le four Smet dont nous avons donné le dessin, chaque groupe de fours du massif a ses cheminées spéciales : on a ainsi un tirage bien égal pour tous, mais on n'utilise pas bien la chaleur du gaz. On construit aujourd'hui comme dans les fours Coppée un carneau collecteur sous le sol afin d'éviter le refroidissement des gaz et une cheminée unique pour un certain nombre de fours. Ces gaz sont utilisés dans les deux systèmes pour le chauffage des chaudières, ainsi qu'on l'expliquera ultérieurement.

Four Appolt ou type plus complexe de fours à parois chauffées.

Le four se compose d'une chambre rectangulaire en briques d'environ

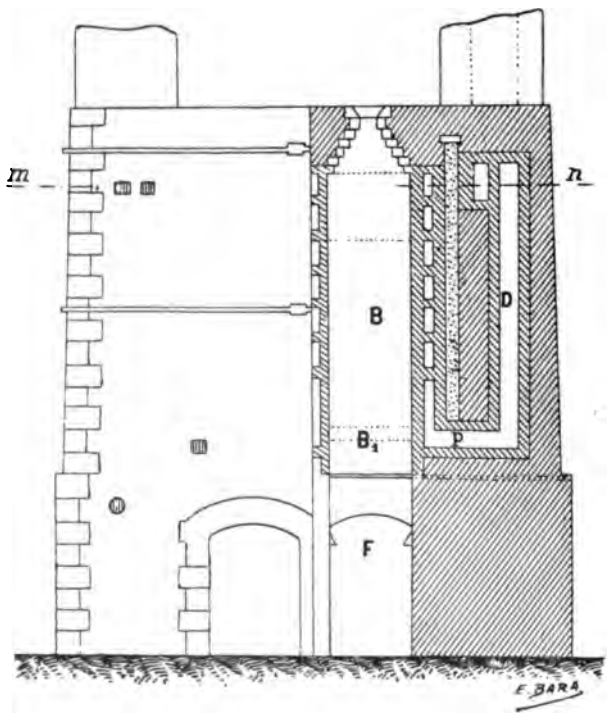


Fig. 10. — Four Appolt. — Demi-élévation. — Demi-coupe transversale suivant *rs*.

5 mètres de longueur, 3m50 de largeur, 4 mètres de hauteur, subdivisée

par des cloisons de 10 à 12 cm. d'épaisseur en douze compartiments (voir fig. 11).

Chacun de ces compartiments peut être considéré comme un four distinct ayant ses parois propres et environné du haut en bas d'un espace libre ; tous les vides communiquant librement et formant une chambre de combustion unique pour l'ensemble.

La série des compartiments est comprise entre quatre murs verticaux en briques réfractaires.

Entre ces murs et le massif extérieur également en briques est un matelas de matières pulvérisées *p* non tassées qui permettent une certaine dilatation de la maçonnerie intérieure du compartiment *B*.

Les douze compartiments (1) sont placés en deux rangées de six, sous chacune desquelles est une galerie qui traverse de part en part le massif, et qui sert à la circulation des wagonnets dans lesquels tombent les charges de coke pour le défournement, en *F*.

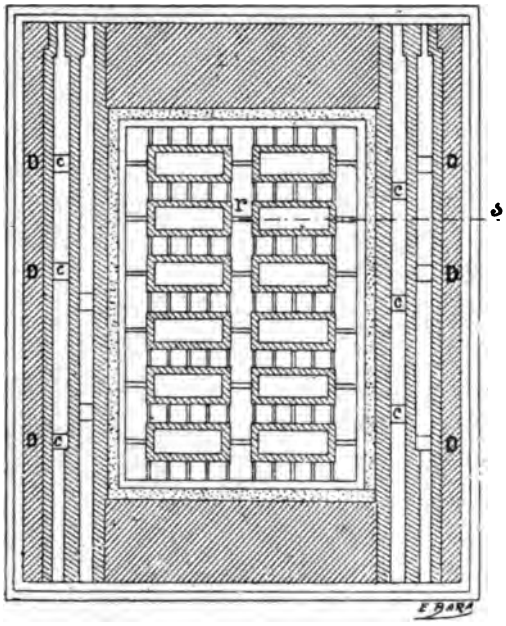


Fig. 11. — Four Appolt. — Coupe en plan suivant *m n*.

Le charbon placé dans l'intérieur du four n'a aucune communication avec l'air extérieur; les gaz se dégagent par des ouvertures plates B_1 (voir fig. 10) disposées sur les quatre faces, en deux rangées tout à fait vers le fond des carneaux de combustion. Il y a, en outre, quelques petites ouvertures vers le haut pour faciliter le dégagement des gaz.

L'air pour la combustion est introduit par de petits orifices pratiqués dans le massif extérieur à trois niveaux différents et dans les voûtes qui supportent les registres de défournement.

(1) Il existe des modèles de fours Appolt à 18 compartiments construits sur le même principe.

Les flammes s'élèvent lentement dans les chambres de combustion; une partie s'élève et sort par six carneaux *c* (fig. 11), trois sur chaque longue face, qui aboutissent à deux cheminées servant pour tout le massif; six autres carneaux *D*, placés tout à fait au bas sur les mêmes faces aspirent une partie des gaz et vont rejoindre également les deux cheminées.

Ces fours conviennent bien aux mélanges très maigres; ils ont l'avantage de chauffer brusquement la houille et de donner un coke de grande densité à cause de la hauteur des charges. Avec des charbons plus gras, le coke est trop petit, les parois sont déformées par le boursouflement de la houille. D'un autre côté, la circulation des flammes est compliquée et rend difficile la répartition convenable des températures.

Les premiers fours Appolt ont été construits en 1858 à Marquise et à Sulzbach, près de Saarbruck; on en a établi dans la suite à Commentry, au Creusot, à Aubin, etc...; il en existe également en Angleterre, en Allemagne notamment aux usines de Phœnix et en Belgique, près de Liège.

Le rendement du four Appolt est toutefois très considérable et égal presque au rendement théorique, la charge n'ayant aucune communication directe avec l'air extérieur; mais le prix du coke produit est assez élevé à cause de l'entretien si coûteux du four lui-même et de l'irrégularité des produits comme grosseur et souvent comme carbonisation.

Aussi préfère-t-on souvent à ces fours dans certaines régions où l'écoulement du coke menu est assez difficile des fours belges à très faible largeur, dans lesquels on peut carboniser des charbons tout aussi maigres.

Il y a lieu de signaler le four Bauer dont l'organisation générale ressemble beaucoup à celle du four Appolt et qui n'en diffère que par des dispositifs de détail ou par le mode de défournement.

On peut aisément se rappeler la structure générale des fours à coke qu'on a décrits ci-dessus par l'image suivante : un livre peut reposer sur une table de trois façons différentes, par une de ses faces, par sa grande tranche ou par une de ses petites tranches. Il représente dans ces diverses positions la forme de la capacité intérieure des fours à boulanger et des fours à parois chauffées (*fours belges et fours Appolt*).

Et, en effet, les fours à boulanger ont une très grande section horizontale et une faible hauteur; les fours belges ont une grande longueur

et une faible largeur ; les fours Appolt ont une grande hauteur et une faible section horizontale.

3° *Fours avec condensation des sous-produits.* — On sait que le coke produit dans la fabrication ordinaire du gaz d'éclairage est trop tendre pour les besoins métallurgiques : il n'est utilisable que dans les petits foyers (usages domestiques). Des recherches ont été tentées pour arriver à récupérer les sous-produits tels que les goudrons et les eaux ammoniacales, tout en produisant un véritable coke métallurgique et employant le gaz ainsi épuré au chauffage même des fours à coke.

Les fours à coke construits dans ce but spécial sont de types fort variés ; on peut néanmoins les rattacher comme organisation générale à la grande classe des fours belges à carneaux horizontaux (type Smet) ou à carneaux verticaux (type Coppée) ; en y ajoutant les dispositifs nécessaires pour leur but spécial.

Au lieu de pénétrer de suite dans les carneaux comme dans les fours à parois chauffées où ils rencontraient l'air venant du dehors qui devait les brûler, les produits gazeux de la distillation sont dirigés par aspiration dans des cuves et des serpentins où ils déposent leurs goudrons et leurs eaux ammoniacales. Cela fait, ces gaz sont refoulés sous la sole du four où on les enflamme en y mélangeant la quantité d'air nécessaire à leur combustion. La chaleur qu'ils développent est suffisante pour provoquer la distillation du charbon contenu dans le four.

Pour obtenir une bonne distillation il ne faut pas carboniser à trop haute température ; car alors le goudron se décompose dans le four, on obtient plus de coke, mais moins de sous-produits. Pour tous ces motifs, la carbonisation se fait toujours plus lentement dans ces fours spéciaux que dans les fours à parois simplement chauffées.

Cette lenteur de marche augmente le prix de revient en diminuant la production.

Les frais de construction des fours de distillation sont considérables; en revanche on recueille le bénéfice de la vente des sous-produits, mais il faut pour cela que l'usine soit bien placée pour leur écoulement. Depuis quelques années l'ammoniaque a trouvé un nouveau débouché dans les fabriques de soude, les huiles de houille ont reçu des applications plus nombreuses, aussi a-t-on cherché à propager l'emploi dans les usines métallurgiques de ces fours spéciaux qui constituent une grande source de production de goudron et d'ammoniaque.

— Dans le four Knab qui est à carneaux horizontaux (type Smet), les gaz sont tout d'abord aspirés par une ouverture ménagée dans la voûte, puis après avoir traversé les condenseurs ils sont ramenés sous la sole au-dessus d'un petit *foyer* auxiliaire où ils se réchauffent assez pour qu'ils puissent s'y brûler et circulent ensuite dans les carneaux des piédroits pour gagner enfin la cheminée.

— Le four Carvès est un four Knab perfectionné, soit au point de vue de la construction même du four, *du chauffage préalable de l'air* destiné à la combustion des gaz épurés, de la condensation mieux assurée des produits, etc...

— Le four Otto est une sorte de four Coppée adapté à la récupération des sous-produits. Ses piédroits renferment des carneaux verticaux aboutissant à un canal longitudinal placé sous la sole. Il y a deux classes de fours Otto : la première classe comprend ceux dans lesquels la condensation n'a lieu que pendant une partie de la durée de la cuisson; dans la deuxième classe, la condensation est continue comme dans les fours Carvès.

— Le four Bauer analogue au four Appolt peut aussi être muni des dispositifs nécessaires pour la condensation des sous-produits.

La plupart des fours précédents peuvent marcher avec ou sans récupération ; on ferme la valve qui communique avec le tuyau d'aspiration; on ouvre un registre donnant directement accès aux gaz dans les carneaux et on fait arriver l'air nécessaire à la combustion par des orifices *ad hoc*. Le four Bauer déjà cité est souvent construit dans ce but.

4) *Extinction du coke.* — Nous avons déjà dit plus haut que le coke était éteint par étouffement ou par aspersion.

Pour éteindre le coke par étouffement, on repoussait le gâteau de coke entre des murs disposés dans le prolongement des piédroits du four, le gâteau était recouvert de cendres de façon à empêcher tout contact de l'air. Au bout d'un temps plus ou moins long (de 12 à 24 heures), la température était suffisamment abaissée pour qu'on pût attaquer la masse et procéder à l'expédition du coke.

Ce procédé qui tend à être abandonné à cause de sa lenteur avait cependant pour avantage de donner un coke parfaitement sec, d'un aspect métallique et d'une couleur claire.

Le procédé d'extinction par aspersion est aujourd'hui généralement adopté : il est rapide, mais ne donne un coke comparable à celui qui a été éteint par étouffement que par un temps chaud et sec et encore

r a-t-il souvent des morceaux ayant reçu un peu trop d'eau et présen-
ant un aspect noir. Une série de robinets de prise d'eau sont établis en
igne, à 6 ou 8 mètres les uns des autres, sur le bord du quai de char-
gement; ces robinets portent des raccords qui reçoivent les tuyaux
l'arrosage à lance.

Dans certaines usines, on rencontre un mode tout particulier d'ex-
inction : la charge totale de chaque four est reçue dans un panier en
fer à claire-voie placé sur la plate-forme de déchargement dans le pro-
ongement du four. Une grue roulante enlève le panier plein de coke
ncandescent et le plonge pendant quelques secondes dans un bassin
plein d'eau ; puis on verse le contenu du panier sur un crible incliné
opérant automatiquement la séparation du gros coke, du petit coke et
des cendres.

5) *Utilisation des flammes perdues des fours à coke.* — Dès le début de l'emploi des fours à boulanger, on a cherché à utiliser une partie de la chaleur perdue soit pour la fabrication de la chaux, soit pour le chauffage des chaudières.

Dans un grand nombre d'installations de fours à coke actuellement existantes, on n'utilise malheureusement qu'une très faible partie des flammes perdues, 1/10 au plus. On demande simplement aux fours de produire la vapeur nécessaire pour les services accessoires : lavage, broyage, défournement mécanique et on perd une énorme quantité de chaleur qui pourrait être utilisée sans déranger aucunement la marche des fours et sans altérer en rien la qualité du coke.

L'économie réalisée par une usine possédant des hauts-fourneaux, aciéries, etc... en utilisant complètement les flammes des fours à coke serait du même ordre que celle qui a été réalisée par l'emploi des gaz combustibles sortant des hauts-fourneaux et sur lequel nous reviendrons longuement. Les usines métallurgiques abandonneraient alors la pratique généralement suivie d'acheter leur coke au lieu de le fabriquer elles-mêmes, pratique conduisant à un véritable gaspillage de combustible.

Il semble toutefois que depuis ces dernières années les industriels commencent à se préoccuper plus sérieusement de cette question importante. Nous donnons ci-dessous, et à titre d'exemple, le schema d'une utilisation des flammes perdues pour le chauffage des chaudières.

Cette installation est celle qu'ont établie les Aciéries de la Marine au Boucau (Basses-Pyrénées).

Il y a 80 fours à coke marchant en 24 heures dont les flammes sont utilisées très complètement. Les fours sont associés par groupe de 20,

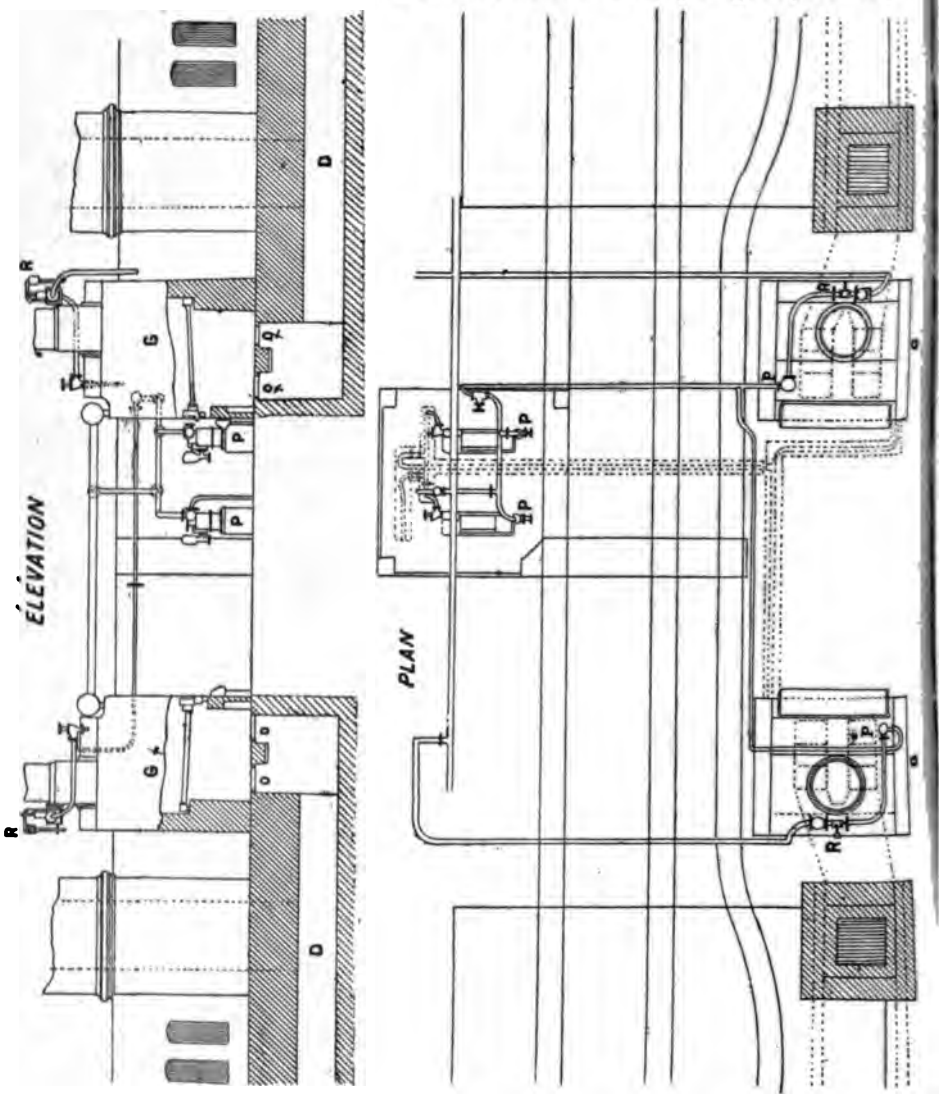


Fig. 12 et 13. — Usines du Boucau. — Installation des générateurs Belleville à la suite des fours à coke.

G G G G, Générateurs Belleville. — *D D*, Conduits amenant les gaz des fours à coke au générateur. — *O O*, Orifices distributeurs des gaz sous les faisceaux de tubes. — *P P*, Pompes. — *R R*, Régulateur de pression à minima avec soupape d'arrêt. — *V V*, Prise de vapeur allant aux pompes. — *V*, Prise de vapeur allant aux machines.

chaque groupe chauffe une chaudière Belleville de 125^{m2} de surface. Il y a donc en tout quatre générateurs.

Chaque groupe possède deux cheminées; une première cheminée dans laquelle les flammes se rendent directement quand la chaudière est hors feu, et une deuxième cheminée qui ne sert qu'au chauffage de la chaudière.

Les gaz chauds arrivent par quatre ouvertures situées dans un même plan horizontal et qu'on peut recouvrir et fermer par quatre dalles réfractaires. Quand la chaudière fonctionne, un registre en tôle empêche les flammes de passer par la première cheminée; pour mettre la chaudière hors feu, on lève ce registre et on pousse les quatre dalles réfractaires.

La température des gaz à la base de la deuxième cheminée est de 320°.

Les fours sont défournés par série de cinq, aussi régulièrement que possible, de façon à uniformiser le dégagement des gaz et la production de la vapeur.

On a quelquefois objecté que l'application du générateur trouble la marche des fours et en diminue la production. Cette objection est fondée quand la même cheminée reçoit tantôt les gaz refroidis par leur passage sous la chaudière, tantôt les gaz incandescents; il se produit, en effet, des variations considérables de tirage, et, si le tirage est strictement suffisant dans le second cas, il devient trop faible dans le premier. Les fours cuisent mal, ou bien on est obligé de diminuer la charge. En tous cas, dans les usines métallurgiques qui trouvent un emploi constant de la vapeur nuit et jour, cet inconvénient n'existe pas, car les registres ne sont manœuvrés qu'à de longs intervalles pour le nettoyage des chaudières seulement.

Il en est de même avec le système des cheminées du Boucau, car on peut même calculer leurs hauteurs de façon que le tirage soit exactement égal, que les chaudières fonctionnent ou non.

Nous avons terminé la revue des différents combustibles solides et liquides employés en métallurgie.

Quant aux combustibles gazeux nous en avons donné plus haut une première utilisation dans le fonctionnement même des fours à coke à parois chauffées. Leur emploi est d'une si grande importance en métallurgie qu'on les fabrique tout spécialement dans certains foyers appelés *gazogènes* formant souvent partie intégrante des fours où on les brûle.

Nous verrons aussi dans le cours de cette étude que d'autres appareils ou fours métallurgiques, les hauts-fourneaux par exemple, produisent indirectement, de par leur fonctionnement même, des gaz combustibles.

Mais l'emploi de ces combustibles gazeux n'est à proprement parler qu'un mode détourné d'utilisation des combustibles solides.

Quant aux flammes perdues, on a déjà vu qu'on pouvait utiliser celles des fours à coke pour le chauffage des chaudières : nous aurons l'occasion ultérieurement de donner d'autres exemples.

Article 4. — Etude théorique élémentaire de la combustion

Nous nous proposons d'exposer les notions généralement admises sur la théorie de la combustion : de cette étude devra ressortir l'avantage considérable qui résulte de l'utilisation méthodique des combustibles sous forme gazeuse.

Le moyen le plus ordinaire pour produire de la chaleur est la *combustion*, c'est-à-dire la combinaison chimique d'un corps appelé combustible avec un autre appelé *comburant*.

Au point de vue général, tout corps qui en s'unissant à un autre dégage de la chaleur peut être appelé *combustible*, mais le plus souvent le *combustible* est un composé de carbone et d'hydrogène unis ou mélangés à d'autres éléments, le comburant est l'oxygène puisé presque toujours dans la masse atmosphérique.

I. — *Pour dégager d'un combustible le maximum de chaleur, il faut d'abord que la combustion soit complète.*

§ 1er *Définitions.* — Donnons tout d'abord quelques définitions nécessaires :

A. — **Combustion complète.**— La combustion est complète quand la quantité d'oxygène fournie est suffisante pour amener à leur maximum d'oxydation les divers éléments dont est composé le combustible ; elle est incomplète quand les produits de la combustion renferment encore du carbone libre, de l'oxyde de carbone, de l'hydrogène libre ou partiellement carburé, etc...

Dans ce dernier cas, il y a évidemment perte de chaleur ; il faudra donc s'opposer à une combustion incomplète dès que le but poursuivi sera l'utilisation *immédiate et totale* de tous les éléments calorifiques contenus dans le combustible. La réalisation d'une combustion intégrale n'est pas aussi facile qu'elle le paraît.

Il faudra d'abord fournir le volume d'air nécessaire en ménageant ans les proportions convenables les orifices d'accès et les moyens de rage et d'insufflation. Admettons que la proportion d'oxygène nécesaire à une combustion complète ait été amenée sur le combustible, il ıudra encore que les molécules d'oxygène viennent forcément au conıct de celles de l'hydrogène et du carbone du combustible.

Nous examinerons plus loin si c'est au combustible solide ou au ombustible gazeux qu'il y a lieu, à cet égard, de donner la préféence.

B. — **Pouvoir calorifique**. — On appelle pouvoir calorifique d'un ombustible la quantité de chaleur dégagée par la combustion d'un ilogramme. Cette quantité évaluée en calories est exprimée, en gééral, par des nombres assez grands ; pour l'avoir en nombres plus imples, on l'évalue souvent en unités de vapeur. L'unité de vapeur roposée par Rankine vaut 537 calories et représente le nombre de alories nécessaires pour vaporiser un kilogramme d'eau.

On a cru longtemps que le pouvoir calorifique d'un combustible déendait uniquement de sa nature chimique, on sait aujourd'hui qu'il arie également avec sa constitution moléculaire. Les corps isomères n'ont pas, en général, le même pouvoir calorifique.

Le pouvoir calorifique d'un corps donné se mesure au moyen d'un calorimètre, en effectuant la combustion dans le vase intérieur muni d'un dispositif spécial. Parfois on l'évalue d'une manière détournée, en chauffant un poids donné du combustible avec de la litharge et pesant le plomb réduit.

Pour donner une idée de la valeur industrielle des combustibles on préfère souvent indiquer la quantité d'eau vaporisée par chacun d'eux, lorsqu'on l'emploie à chauffer une chaudière bien établie. Le nombre exprimant le poids d'eau vaporisée devrait se confondre avec celui qui exprime le pouvoir calorifique en unités de vapeur ; il est loin d'en être ainsi, car dans le chauffage des chaudières, même les meilleures, on perd une grande partie de la chaleur dégagée.

Cette perte est encore bien plus grande dans les divers appareils métallurgiques.

Il ne faut point oublier, d'autre part, que les nombres représentant les pouvoirs calorifiques sont déterminés en supposant que la combustion soit complète ; or, il se forme toujours plus ou moins d'oxyde de

carbone, d'où perte très appréciable de calories par kilogramme de carbone incomplètement brûlé.

C. — **Température de combustion.** — On entend par température de combustion la température théorique que les produits de la combustion atteindraient, en admettant que la chaleur développée soit uniquement absorbée par ces produits et que les chaleurs spécifiques restent invariables à toutes les températures.

Cette double hypothèse ne se réalise jamais complètement ; les chaleurs spécifiques croissent en général avec les températures, puis une partie de la chaleur se perd par rayonnement et par le contact des appareils dans lesquels s'opère la combustion. Cette valeur théorique permet cependant d'apprécier la valeur relative des combustibles au point de vue de la température que l'on peut en espérer.

La température de combustion est, par suite, une sorte de mesure de l'énergie d'un combustible : chaque combustible ne pourra être employé qu'aux opérations dans lesquelles la température à réaliser est inférieure à sa température de combustion.

On trouve dans les ouvrages spéciaux (Métallurgie de Gruner, Métallurgie de Le Verrier, etc...) les méthodes générales ou simplifiées permettant de calculer les températures de combustion théoriques des divers combustibles : nous indiquerons plus loin le mécanisme de ces méthodes.

§ 2e. *Il n'est pas aisé de réaliser une combustion complète avec un combustible solide.* — Supposons, ce qui est le cas à peu près général, que le combustible solide soit brûlé sur une grille ; faisant abstraction de la combustion tout à fait spéciale des hauts-fourneaux ou fours à cuve (1).

Admettons que par un tirage approprié, un écartement convenable des barreaux de la grille et une épaisseur requise du combustible chargé on puisse disposer du cube d'air nécessaire pour une combustion complète.

Sans entrer dans le détail de la description des différents fours avec foyers à grille, ce qui ressortit à la métallurgie générale, admettons comme type celui qu'indique la figure et dont la légende explique suf-

(1) La théorie du haut-fourneau comprendra un aperçu suffisant sur la combustion dans les fours à cuve ; nous ne saurions en parler maintenant sans nuire à la clarté du sujet.

fisamment la construction. C'est le four ordinaire *de puddlage* servant à l'élaboration à l'état pâteux du fer et de l'acier, c'est aussi à peu de

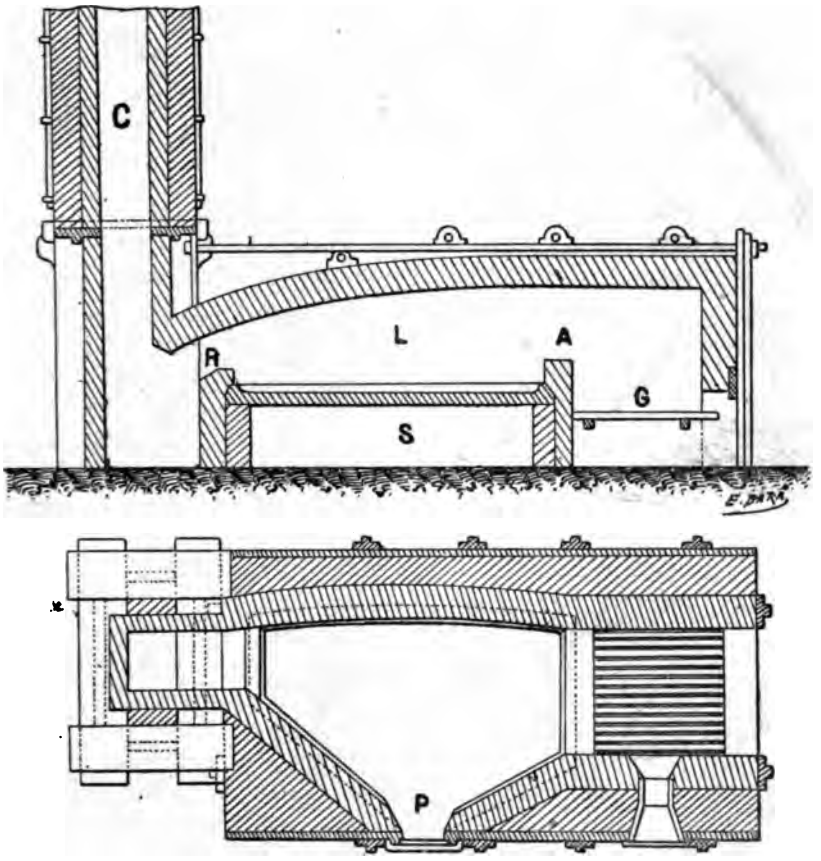


Fig. 14 et 15. — Four à grille (type employé au puddlage).
C, Cheminée. — *R*, Rampant. — *L*, Laboratoire. — *S*, Sole. — *A*, Autel. — *G*, Grille. *P*, Porte de travail.

chose près le type des fours à réchauffer pour le travail des fers et des aciers, etc...

A. — **La combustion n'est pas comparable d'un point à un autre.** — Malgré les soins les plus minutieux apportés au service d'un foyer on ne peut éviter de grandes inégalités locales dans les proportions relatives d'air et de matière combustible. En supposant que le chargement ait été absolument régulier à l'origine, les différences dans le tirage ou dans la composition même du combustible entraînant une combustion irrégulière ne tarderont pas à changer les conditions initiales.

Il y a excès d'air là où la grille est peu couverte et sur les points où le combustible est en fragments volumineux, excès d'éléments combustibles là où la charge est haute ou fortement tassée.

Presque toujours le chargement a d'ailleurs lieu d'une façon intermittente, en sorte que non seulement les choses se passent à un moment donné d'une façon différente sur les divers points de la grille, mais encore il y a des inégalités périodiques après chaque nouvelle charge.

B. — **Les divers éléments d'un combustible solide n'exigent pas tous les mêmes conditions pour une combustion complète. Il y a des pertes forcées.** S'il ne s'agissait que de brûler un combustible solide obtenu à la suite d'une distillation tel que le coke ou le charbon de bois, il suffirait de prévenir la formation d'oxyde de carbone, ce qui n'est déjà pas très facile; mais, lorsqu'il s'agit de combustibles à éléments volatils il y a à assurer la combustion complète des vapeurs et des gaz dégagés à la distillation en même temps que celle du résidu solide carbonisé. Or, les conditions d'une combustion complète qui conviennent aux uns ne conviennent pas aux autres, il faut un tirage différent, etc...

L'écartement des barreaux est réglé de façon que l'air puisse arriver en quantité suffisante au contact du combustible; plus cet écartement est grand, plus on s'approche des conditions d'une bonne combustion. Or, ou bien les barreaux sont trop serrés et alors beaucoup d'éléments ne sont pas intégralement brûlés par manque d'air, ou bien les barreaux sont trop espacés et alors une forte proportion de combustible menu coule non brûlé dans le cendrier. Cette perte n'est jamais nulle dans la pratique.

Si, d'autre part, on marche avec une forte épaisseur de combustible sur la grille ou que la vitesse d'arrivée de l'air ne soit pas suffisante, l'oxygène se trouvera en présence d'un excès de carbone; il y aura production d'oxyde de carbone. La proportion de cet oxyde diminuera à mesure que la vitesse du courant d'air augmentera ou que la couche de combustible sera moins épaisse, mais il pourra y avoir par contre une certaine quantité d'oxygène non utilisé. Il y aura donc une épaisseur moyenne et un tirage moyen correspondant à la production minima d'oxyde de carbone.

Comme d'autre part, ainsi qu'on l'a vu précédemment, il y a aussi des hydrocarbures à brûler, il est clair que si on a pu réduire au mi-

nimum la perte par l'oxyde de carbone il n'en sera pas de même pour les produits carburés.

Pour éviter une proportion élevée de gaz non brûlés, il faut, en général, un grand excès d'air. Au fond, cet excès ne nuirait pas si la fumée pouvait toujours être abandonnée à basse température. La chaleur momentanément absorbée par l'excès d'air sera alors de nouveau utilisée, mais le plus souvent dans les foyers cela est impossible, de sorte que l'on est toujours placé dans cette alternative fâcheuse d'une perte de chaleur par excès d'air ou d'une perte causée par la présence dans la fumée de gaz non brûlés.

C. — **Le comburant et les éléments combustibles n'auront pas toujours la température nécessaire pour réagir les uns sur les autres.** — On n'ignore pas que pour qu'une combustion vive se produise ou continue à s'opérer, il est nécessaire de maintenir dans le milieu où on l'a déterminée une température assez élevée. Si cette température s'abaisse trop par le voisinage ou par le contact de corps refroidissants, la combustion s'arrête. Ce fait est facile à constater en plaçant dans une flamme d'hydrocarbure un corps froid quelconque, il se produit immédiatement un dépôt de noir de fumée qui disparaît si on laisse au corps le temps de s'échauffer et d'acquérir la température à laquelle la combustion peut s'effectuer. Cet appoint de chaleur nécessaire représente l'énergie initiale nécessaire pour faire passer un corps ou système de corps d'un état à un autre ainsi que l'a magistralement démontré *M. Berthelot* dans ses études thermochimiques.

Si l'on diminue outre mesure l'épaisseur de la couche combustible chargée sur la grille, l'air la traversera inégalement et peut-être trop vite pour qu'il puisse se chauffer jusqu'au degré nécessaire à la combustion complète des produits gazeux de la distillation.

La distillation qui s'effectue sur toute grille est une cause de refroidissement et comme elle atteint son maximum d'énergie à chaque nouvelle charge, il arrive habituellement qu'à ce moment les produits distillés comme le combustible soumis à la distillation, sont tous deux refroidis au-dessous du point de leur inflammabilité. La combustion est alors incomplète, les produits brûlés renferment des gaz, des vapeurs combustibles et du noir de fumée,

§ 3° *Pourquoi la combustion de combustibles gazeux sera-t-elle plus parfaite?* On verra comment on peut transformer les combustibles

solides en combustibles gazeux par voie de combustion incomplète dans des appareils spéciaux appelés gazogènes. Le gaz combustible produit se compose d'un mélange d'hydrogène, d'oxyde de carbone, d'azote, d'hydrocarbures, etc...

Au point de vue de la chaleur totale produite, il est clair qu'on ne gagne absolument rien à gazéifier le carbone, on perd même la quantité de chaleur résultant du passage du carbone à l'état d'oxyde de carbone puisqu'on ne se propose d'utiliser que la chaleur dégagée par la combustion des gaz combustibles dans un appareil distinct du gazogène. Bien plus, si les gaz combustibles ainsi produits devaient se refroidir partiellement avant d'être brûlés, on perdrait nécessairement cette fraction de la chaleur totale. Il faut donc brûler les gaz immédiatement après leur préparation, au voisinage même du gazogène dans lequel ils ont été engendrés.

Quoi qu'on fasse, il y aura une fraction de la chaleur produite par la combustion partielle qui sera perdue par conductibilité dans le gazogène lui-même ou dans le parcours effectué par les gaz du gazogène au four où on doit les brûler.

Mais s'il est vrai qu'une partie du carbone passera à l'état d'oxyde de carbone et une partie des hydrocarbures à l'état d'hydrocarbures inférieurs les *avantages du combustible gazéifié résultent des motifs suivants :*

A. — **Il est possible avec les gaz de régler la quantité d'air nécessaire à la combustion complète et de multiplier les points ou surfaces de contact du gaz et de l'air comburant.** On les fera arriver l'un et l'autre en lames parallèles alternantes de faibles dimensions, ou bien on fera pénétrer l'air en jets isolés au milieu du gaz, etc...

Disons avec *Gruner* qu'il n'en demeure pas moins vrai, même en attribuant à l'adage des anciens « *corpora non agunt nisi soluta* » une valeur restreinte, que les gaz se combinent plus facilement qu'un corps solide et l'air et surtout qu'il est plus facile de doser l'air de façon à brûler convenablement du charbon gazéifié que de la houille en morceaux.

On doit concevoir aussi *à priori* que cette dernière opération sera d'autant plus difficile que le combustible solide renfermera une proportion plus élevée de cendres formées de matières terreuses incombustibles.

B. — **Les gaz pourront être chauffés au préalable.**— De cette façon, on assurera dans tous les cas leur inflammation : nous avons vu, en effet, que dans la combustion sur grille, nombreuses étaient les causes de refroidissement qui s'opposaient à un moment donné à l'inflammation certaine des gaz combustibles. Ce chauffage préalable pourra être réalisé en disposant au point d'arrivée des gaz une enceinte à parois fortement incandescentes échauffée, par exemple, par les produits brûlés se rendant à la cheminée, par un foyer allumé au préalable et à combustible solide mais de qualité inférieure, etc...

C.— **Enfin on pourra développer une chaleur d'autant plus intense que l'air et le gaz combustibles auront été portés à une température plus élevée avant leur combustion.** Or, il n'est pas possible de chauffer à haute température avant de le brûler un combustible solide.

Nous nous proposons de montrer que par ce chauffage préalable de l'air et du gaz on élève dans de très fortes proportions la température de combustion. C'est ainsi qu'on arrive à réaliser couramment dans les fours à gaz des températures supérieures à celles que donnaient dans les anciens fours les meilleurs combustibles.

Comme cette question est du plus haut intérêt nous pensons devoir lui consacrer quelques développements.

II. — *La température de la combustion croîtra avec la chaleur apportée séparément par le comburant et par le combustible lors de la combustion.*

La température produite par la combustion dépend d'un grand nombre de facteurs :

De la nature du combustible ;
De celle du comburant ;
De leurs proportions relatives comme il a été dit ;
De leurs températures initiales.

C'est ce dernier point que nous allons examiner.

§ 1er *De l'hypothèse nécessaire pour établir la valeur de la température de combustion.* — En général, la chaleur Q dégagée par un foyer quelconque peut se diviser en deux parties : la chaleur R rayonnée sur les parois de l'enceinte où s'opère la combustion et qui est absorbée et

transmise par ces parois, la chaleur G employée à élever la température des gaz de la combustion.

La chaleur rayonnée R n'est jamais nulle mais on conçoit que sa valeur puisse être très faible selon la construction des foyers, le mode d'utilisation de la chaleur, etc.....

Examinons pour le moment le cas où le foyer est *placé dans une enceinte en maçonnerie que nous supposerons assez épaisse pour qu'on puisse admettre qu'il ne se perd pas de chaleur à travers ses parois.*

Dans ces conditions, la température à laquelle sont portées les parois est à peu près la même que celle du foyer ; il y a rayonnement réciproque à la même température, les parois rendent ce qu'elles reçoivent, de sorte que la chaleur transmise par rayonnement est nulle.

Dans ce cas R=0, toute la chaleur produite par la combustion est employée à élever la température des gaz qui se dégagent du foyer et on a : Q=G.

Telle est l'*hypothèse nécessaire* qu'il faut admettre pour pouvoir définir la température de combustion et la calculer.

C'est ainsi qu'il faut comprendre la définition que nous avons donnée antérieurement à propos des notions générales sur les combustibles quand nous avons dit plus haut : « *La température de combustion est « la température théorique que les produits de la combustion atteindraient en admettant que la chaleur développée soit uniquement « absorbée par ces produits.* »

§ 2°) *Expression de la température de combustion quand la chaleur rayonnée est nulle.* Pour établir la valeur de la température du foyer ou de la combustion *quand la chaleur rayonnée est nulle* il suffit donc de déterminer d'un côté la quantité de chaleur Q fournie par la combustion et de l'autre la nature et le poids des produits de cette combustion et qui doivent l'absorber par leur élévation de température.

A — **Calcul de la température de la combustion en supposant le combustible et l'agent comburant à 0°.** — Soit un corps composé d'un mélange de plusieurs éléments combustibles dont les poids sont P_1, P_2, P_3.....

Soient q_1, q_2, q_3,... les pouvoirs calorifiques de chacun de ces éléments : nous savons que le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité de chaleur exprimée en calories dégagée par la combustion

complète d'un kilogramme de ce combustible. Supposons pour l'instant que nous sachions mesurer les quantités q_1, q_2, q_3,...

Soient d'autre part p_1, p_2, p_3,... les poids des produits respectifs de la combustion et c_1, c_2, c_3,... leurs chaleurs spécifiques.

$P_1 q_1 + P_2 q_2 + P_3 q_3 + \ldots\ldots$ ou $\Sigma.Pq$ représentera la quantité de chaleur totale fournie au foyer par la combustion.

C'est cette chaleur qui élève au-dessus de 0° la température des produits de la combustion.

La chaleur absorbée par les produits de la combustion sera, si t est leur température commune lors de la combustion :

$p_1 c_1 t + p_2 c_2 t + p_3 c_3 t + \ldots\ldots$ ou $t.\ \Sigma.pc$.

Dans l'hypothèse faite de parois en maçonnerie ne laissant pas perdre de chaleur on aura : $\Sigma.Pq = t.\ \Sigma.pc$.

$$\text{ou } t = \frac{\Sigma.Pq}{\Sigma.pc}$$

Rappelons que cette température théorique des produits de la combustion est établie en admettant que la chaleur développée soit uniquement absorbée par ces produits et que les chaleurs spécifiques restent invariables à toutes les températures.

Cette double hypothèse ne se réalise jamais complètement ; les chaleurs spécifiques croissent en général avec les températures, puis une partie de la chaleur se perd par rayonnement et par le contact des appareils dans lesquels s'opère la combustion, ainsi qu'on l'a dit antérieurement. D'un autre côté, les pouvoirs calorifiques sont déterminés en supposant que la combustion soit complète, nous avons vu à propos des combustibles solides combien il était difficile de la réaliser.

B. — **Que devient la valeur de t quand le combustible et le comburant sont à une température supérieure à zéro ?** La formule $t = \frac{\Sigma.Pq}{\Sigma.pc}$ suppose le combustible et l'agent comburant à 0°.

Or l'un et l'autre peuvent être chauffés à un certain degré et le sont même toujours dans les foyers avant de se combiner.

Pour apprécier l'influence de cette chaleur apportée, il suffit d'ajouter au numérateur de l'expression de t les chaleurs propres que possèdent le comburant et le combustible avant de s'unir.

Soit P le poids du corps combustible, C sa chaleur spécifique, Θ sa température initiale quand on l'introduit dans le foyer ; soit de même

P' le poids du comburant (oxygène ou air), C' sa chaleur spécifique et θ' sa température d'arrivée au foyer.

$PC\theta + P'C'\theta'$ sera la quantité de chaleur renfermée dans le combustible et dans le comburant *en comptant à partir de zéro.*

La chaleur totale dégagée par la combustion vaudra $PC\theta + P'C'\theta' + \Sigma Pq$.

Si l'on suppose la chaleur rayonnée nulle on devra avoir :

$$PC\theta + P'C'\theta' + \Sigma.Pq = t.\Sigma.pc$$

$$\text{D'où } t = \frac{PC\theta + P'\theta'C' + \Sigma.Pq}{\Sigma.pc}$$

Lorsque les combustibles *laissent des cendres*, ce qui est le cas des combustibles solides, $\Sigma.pc$ doit, bien entendu, renfermer un terme comprenant la chaleur retenue par ce résidu solide chauffé aussi comme les produits gazeux de la combustion jusqu'à la température théorique t.

La formule ci-dessus est évidemment une formule limite mais elle est fort utile à considérer pour fixer sur la valeur relative des combustibles, des erreurs d'un ordre à peu près comparable existant de l'un à l'autre.

Dans tous les cas, on devra agir sur tous les facteurs variables dont on dispose pour qu'on puisse l'appliquer avec plus de certitude.

Cette formule montre tout d'abord que la température de combustion sera d'autant plus élevée que les températures initiales θ et θ' le seront elles-mêmes davantage. Pour avoir de hautes températures, il y a donc intérêt à chauffer le combustible et le comburant ou simplement l'un ou l'autre avant leur combinaison. C'est, par exemple le *cas des hauts-fourneaux à fonte de fer* où l'on injecte par les tuyères de l'air porté à haute température par son passage dans une chambre à briques préalablement chauffée par la combustion d'une partie des gaz combustibles s'échappant du gueulard.

Nous verrons plus tard lors de l'étude des fours à gaz du système *Siemens* comment en s'appuyant sur les considérations précédentes on peut expliquer le grand rendement calorifique de ces appareils.

III. — *Expériences et lois relatives au pouvoir calorifique.*

En 1780, *Laplace et Lavoisier*, puis après eux *Rumfort*, *Clément et Desormes*, *Despretz et Dulong* font des expériences les premiers dans un

calorimètre à glace, les autres dans un calorimètre à eau pour déterminer les pouvoirs calorifiques.

Les appareils employés, fort rudimentaires du reste, donnent des nombres peu concordants.

Nous renvoyons au remarquable traité de « Physique industrielle » de M. Ser pour l'étude complète de ces expériences.

§ 1er. — *Expériences de MM. Favre, Silbermann et Berthelot.* — MM. Favre et Silbermann publièrent en 1853 un important mémoire sur les chaleurs de combustion ; ce travail fait aujourd'hui encore autorité incontestée dans la question.

Nous ne décrirons pas l'appareil employé par ces physiciens et comprenant 1° le calorimètre proprement dit, 2° la chambre à combustion.

Les précautions minutieuses étaient prises pour avoir des combustibles et de l'oxygène purs. Les produits de la combustion étaient recueillis et analysés avec le plus grand soin afin de tenir compte de la chaleur qu'auraient dû *dégager les gaz incomplètement brûlés.*

Sept expériences faites avec des durées différentes sur la combustion du carbone ont donné sept nombres dont le plus faible est 8064 calories et le plus fort 8095 calories, la moyenne étant 8080 calories. On a trouvé constamment dans les gaz dégagés une certaine proportion d'oxyde de carbone. Pour avoir le pouvoir calorifique on ajoutait à la chaleur mesurée par le calorimètre celle que l'oxyde de carbone aurait produite pour passer à l'état d'acide carbonique.

Comme on l'a déjà dit, on remarqua que le pouvoir calorifique dépendait de l'état moléculaire du corps : le carbone dégage à l'état de charbon de bois calciné 8080 calories, tandis qu'à l'état de graphite naturel il en produit seulement 7796 et 7770 à l'état de diamant.

Les mêmes différences s'observent avec le soufre ; le soufre mou ou récemment cristallisé produit 2260 calories, tandis que le soufre préparé depuis longtemps et plus agrégé ne dégage que 2220 calories.

Il importe de remarquer que le pouvoir calorifique a été déterminé dans ces expériences en prenant le combustible et l'oxygène à la température du calorimètre qui s'écartait peu de celle de l'extérieur.

Il en résulte que pour les combustibles donnant comme l'hydrogène des produits gazeux qui passent à l'état liquide à cette température on comptera dans le pouvoir calorifique la chaleur de condensation de la vapeur.

Par la même raison, quand on brûle des hydrogènes carburés et que

la vapeur d'eau produite s'échappe avec les gaz de la combustion sans être condensée, il y a lieu de retrancher du pouvoir calorifique qui a été déterminé en supposant cette condensation le nombre des calories représentant la chaleur de vaporisation de l'eau.

M. Berthelot a fait à son tour une longue série d'expériences, au moyen d'appareils d'une grande précision pour déterminer les chaleurs dégagées par la formation d'un grand nombre de corps composés.

Il se servait d'un calorimètre et d'une chambre de combustion disposés de diverses manières suivant la nature de l'expérience.

§ 2. — *Lois relatives au pouvoir calorifique.* — La quantité de chaleur mesurée par le calorimètre est la résultante de plusieurs actions simultanées ou consécutives.

Ainsi dans la combustion du carbone on peut distinguer trois phénomènes distincts :

1° Le passage du combustible de l'état solide à l'état gazeux, d'où absorption de chaleur.

2° La combinaison de C avec O, accompagnée d'un dégagement de chaleur.

3° La réduction de volume, CO^2 ayant un volume égal aux 2/3 de la somme des volumes de la vapeur de C et de O ; cette réduction doit produire de la chaleur.

De même dans la combustion de H, on peut distinguer :

1° La combinaison chimique qui produit de la chaleur.

2° La contraction de un tiers du volume total qui en dégage également.

3° La condensation de la vapeur d'eau produite qui en abandonne encore une certaine quantité.

Dans la combustion des corps composés, il se produit des phénomènes analogues et de plus il faut tenir compte de la chaleur de décomposition (*le plus souvent négative*) qui doit précéder la combustion.

Dans la détermination du pouvoir calorifique, le calorimètre mesure en bloc, comme on l'a dit, toutes ces chaleurs positives ou négatives et on n'a pu trouver jusqu'à présent des lois générales permettant de calculer exactement le pouvoir calorifique d'un combustible d'une composition chimique connue.

Mais l'application des principes généraux de la physique et les résultats des expériences permettent de formuler certaines règles susceptibles de donner dans la plupart des cas une indication au moins approchée de la chaleur dégagée par un combustible.

A. — **Lois générales.** — Nous nous contenterons de formuler ces lois renvoyant pour plus de détails aux études et expériences thermochimiques :

1° La chaleur qui est produite dans la combinaison de deux corps est toujours égale et de signe contraire à la chaleur de décomposition.

2° La quantité de chaleur dégagée par un combustible est indépendante de l'activité de la combustion.

La combustion lente donne la même chaleur que la combustion vive, quand on tient compte convenablement des causes de refroidissement; *mais la température peut-être très différente.*

3° La quantité de chaleur dégagée est indépendante de la proportion d'oxygène qui se trouve dans le comburant.

La chaleur dégagée avec l'oxygène pur est la même qu'avec l'air.

4° Dans le phénomène complexe d'une combinaison chimique, la chaleur dégagée est la somme algébrique des quantités produites par chacun des phénomènes en particulier.

C'est-à-dire qu'elle est la même que si ces phénomènes, au lieu d'être simultanés, se produisaient successivement et d'une manière indépendante.

B. — **Loi de Dulong.** — Cette loi n'est qu'approchée mais elle est souvent employée à cause de sa simplicité. Elle s'énonce :

« *La chaleur dégagée par un combustible est égale à la somme des* « *quantités de chaleur dégagées par la combustion des éléments qui le* « *constituent, en ne tenant pas compte toutefois de la portion d'hydro-* « *gène qui peut former de l'eau avec l'oxygène du combustible.* »

Cette réserve revient à admettre que l'eau est toute formée dans le combustible.

Elle s'exprime par la formule :

$$Q = 8080\,C + 34462\left(H - \frac{O}{8}\right)$$

Q est le pouvoir calorifique d'un combustible qui contient par kilogramme les poids respectifs C de carbone, H d'hydrogène et O d'oxygène.

Cette formule s'applique au cas où la vapeur d'eau est condensée ; si elle ne l'était pas, il faudrait remplacer 34462 qui est le pouvoir calorifique de l'hydrogène par 29000, nombre obtenu en retranchant le nom-

bre de calories correspondant à la condensation non effectuée des 34462 calories obtenues quand la vapeur produite est condensée dans le calorimètre.

Pour la plupart des corps, la loi de *Dulong* donne des résultats assez approchés.

Pour l'hydrogène bicarboné et pour l'alcool, il y a presque identité entre les résultats du calcul et ceux de l'expérience. Pour d'autres, tels que l'hydrogène protocarboné, la différence est au contraire très considérable. Ce résultat n'a pas lieu de surprendre, la loi de *Dulong* ne tenant aucun compte de l'état d'agrégation des molécules qui doit cependant avoir une grande influence sur la chaleur dégagée.

C. — *Loi de Welter.* — *Welter*, en comparant les résultats obtenus par divers physiciens, fut conduit à formuler une relation entre la quantité d'oxygène absorbée et le pouvoir calorifique et il énonça la loi suivante :

« *La chaleur dégagée dans la combustion est proportionnelle à la* « *quantité d'oxygène absorbée.* »

La loi se traduit par la formule :

$$Q = K.P_0$$

Q étant le pouvoir calorifique, P_0 le poids d'O nécessaire à la combustion de 1 kilo, K un facteur numérique.

Si un combustible renferme par kilogramme C de carbone et H d'hydrogène, comme il faut 16 d'O pour brûler 6 de C et 8 d'O pour 1 de H, on a pour P_0

$$P_0 = \frac{16}{6}C + 8H = 8\left(\frac{C}{3} + H\right)$$

$$\text{D'où } Q = 8K\left(\frac{C}{3} + H\right)$$

Cette loi est fort simple, mais elle est malheureusement inexacte dans certains cas, car il est démontré par l'expérience que quelques corps en se combinant avec O absorbent de la chaleur au lieu d'en dégager.

C'est sur la loi de *Welter* qu'est fondé le procédé de *Berthier* pour obtenir le pouvoir calorifique d'un combustible. Il consiste à déterminer le poids d'O absorbé par la combustion en calcinant dans un creuset un poids donné du combustible avec un excès de litharge et pesant le plomb réduit.

Cette étude théorique élémentaire de la combustion clôture l'exposé des *notions préliminaires* qu'il était indispensable de connaître avant d'aborder les procédés d'élaboration proprement dits.

Nous commencerons maintenant l'étude de la fabrication de la fonte qui est, actuellement du moins, le *métal-mère* des métaux dérivés du fer.

TITRE I

LE HAUT-FOURNEAU

Fabrication de la Fonte.

Définitions. — Les métaux qu'on a à isoler sont toujours engagés dans des combinaisons oxygénées ; soit parce que le minerai est naturellement un oxyde, soit parce que ce minerai a subi un grillage préalable.

Le carbone, l'oxyde de carbone, les hydrocarbures, certains métaux ou métalloïdes plus avides d'oxygène que le métal à isoler sont appelés *agents réducteurs.*

La réduction est une opération qui consiste à décomposer par des agents réducteurs les minerais oxydés pour en séparer le métal.

Les procédés réductifs se divisent en 2 catégories :

La réduction proprement dite,

La fusion réductive.

a) Réduction proprement dite. — Dans la réduction proprement dite l'oxyde est réduit sans fusion préalable par le simple contact à chaud d'un réducteur solide, liquide ou gazeux. Par ce procédé appelé *direct* parce qu'il a la prétention de donner le métal en traitant directement le minerai, on obtient le fer sous forme d'une masse spongieuse à l'état pâteux contenant une proportion plus ou moins grande des matières étrangères du minerai, suivant la pureté de ce dernier.

C'est par un travail ultérieur de compression, au marteau par exemple, qu'on chassera les impuretés de la masse ferreuse.

b) Fusion réductive. — Dans la fusion réductive, on réalise une température suffisante pour amener à l'état liquide le produit métallique résultant de la réduction ainsi que les matières étrangères du minerai. Ces matières étrangères se trouvent toutefois associées à des corps étrangers qu'on a ajoutés à dessein pour constituer des combinaisons nouvelles ayant pu aisément se séparer par liquation de la masse métallique.

Quant à la masse métallique, elle ne contient pas le fer à l'état plus ou moins pur comme l'éponge du procédé direct, mais un métal tout différent qui est la fonte.

On n'a pas pu, en effet, à pareille température, empêcher l'action réductive de s'exercer sur les autres oxydes accompagnant l'oxyde de fer dans le minerai ni s'opposer à une certaine incorporation de l'agent réducteur lui-même *(le charbon par exemple)* dans la masse ferreuse.

En résumé, la fusion réductive constitue un *procédé indirect* parce qu'elle ne donne pas par le traitement du minerai le métal lui-même mais un produit intermédiaire dans lequel le fer se trouve plus concentré et dont on l'extraira par un procédé ultérieur d'épuration appelé *affinage.*

c) Valeur des deux procédés. — Tous ceux qui ont voulu opérer simultanément la réduction du minerai et l'épuration du métal se sont toujours butés au double inconvénient d'un déchet considérable et d'une fabrication irrégulière comme qualité.

La transformation du minerai en fer métallique dans une seule et même opération, réalisée par les peuplades sauvages des temps anciens ou des pays lointains, n'a pu encore devenir pratique malgré les nombreux essais tentés depuis le commencement du siècle. Il en sera parlé ultérieurement.

La simple réduction exige un minerai exceptionnellement riche, sinon l'éponge métallique contient une proportion tellement élevée de matières terreuses que, sans fusion, l'épuration en est impossible.

Ainsi donc, et quoiqu'il puisse paraître peu logique pour obtenir du fer doux de traiter d'abord le minerai à haute température pour en retirer la fonte, il n'en n'est pas moins certain que cette façon d'agir est la seule possible dès que le minerai n'est pas riche et pur.

L'expérience a, en effet, prouvé que la seule formule rationnelle en l'état actuel de l'industrie sidérurgique consistait à faire succéder deux opérations bien distinctes : *l'une de fusion réductive* qui donne naissance à la fonte, soit à un composé multiple de fer avec plus ou moins de corps étrangers réduits en même temps que lui (Mn, Si, Ph, S, etc.....) ou incorporés et associés directement avec lui (*le carbone*) ; *l'autre d'affinage* qui produit le fer plus ou moins pur, par combustion plus ou moins complète des éléments étrangers.

Il importe donc d'étudier tout d'abord l'appareil métallurgique permettant d'obtenir la fonte de fer, produit intermédiaire entre le minerai

et les aciers ou fers plus ou moins purs, lorsqu'elle n'est pas employée directement telle quelle par la fonderie pour des usages que nous définirons.

CHAPITRE Ier

RÉACTIONS DU HAUT-FOURNEAU

Avant d'aborder cette étude théorique, il est nécessaire d'indiquer l'organisation générale du haut-fourneau qui est l'appareil métallurgique d'élaboration des fontes; nous réservant dans les chapitres qui suivent d'en étudier l'organisation détaillée.

ARTICLE 1er. — GÉNÉRALITÉS SUR LE HAUT-FOURNEAU

A.— *Description sommaire du haut-fourneau.*— Les hauts-fourneaux font partie de la classe des fours dits fours à cuve et à air soufflé. Ces fours sont employés pour produire de fortes températures et les matières qu'on y charge en sortent presque toujours à l'état de fusion; c'est ce qui arrive notamment pour la fonte de fer. On peut y distinguer quatre parties :

1° *L'ouvrage* qui se trouve en bas et autour duquel débouchent les tuyères amenant l'air sous pression. Cet air aura été chauffé au préalable dans des appareils spéciaux dits à air chaud.

Nous en verrons plus tard la raison.

2° *Le creuset* est la partie du four située au-dessous des tuyères et où se rassemblent les matières fondues. Il constitue le prolongement même de l'ouvrage et en a le diamètre. Nous verrons ultérieurement qu'il y a des hauts-fourneaux à *avant-creuset.*

3° *Les étalages* sont constitués par un tronc de cône raccordant la partie la plus large du four qu'on appelle le *ventre* à la partie supérieure de l'ouvrage.

4° *La cuve* dont l'orifice supérieur s'appelle le *gueulard* a la forme d'une surface de révolution et se raccorde à l'ouvrage par l'intermédiaire des étalages.

Dans les hauts-fourneaux à fonte de fer marchant au coke on a poussé parfois la hauteur jusqu'à 30 mètres; mais il vaut mieux ne pas dé-

passer 18 ou 20 mètres. Pour les hauts-fourneaux à fonte de fer marchant au charbon de bois, la hauteur ne dépasse pas en général 12 mètres, cependant on peut aller sans inconvénient jusqu'à 15. On ne saurait dépasser cette valeur sans s'exposer à écraser les diverses charges du combustible végétal.

Quant aux fours à cuve destinés au traitement des minerais autres que ceux de fer, il y a lieu de signaler pour mémoire que leur hauteur ne dépasse presque jamais 7 mètres et quand le minerai est pulvérulent la hauteur s'abaisse parfois à 5 mètres et même à 3 mètres.

D'une manière générale, on réserve le nom de *hauts-fourneaux* aux fours à cuve ayant plus de 10 mètres de haut, celui de *four à manche* aux fours très peu élevés et on appelle *demi-hauts-fourneaux* ceux qui ont des dimensions moyennes.

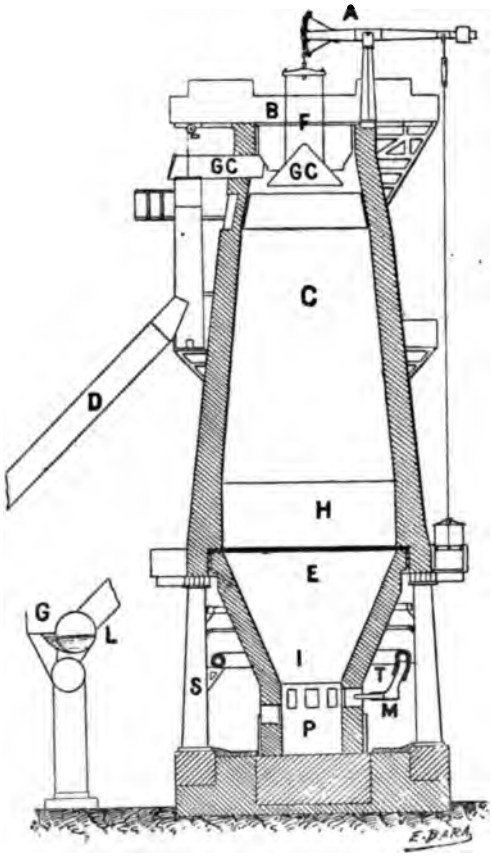


Fig. 16. — Haut-fourneau.

A, Appareil de chargement. — *B*, Plateforme de chargement. — *C*, Cuve. — *D*, Prise de gaz latérale. — *E*, Etalages. — *F*, Gueulard. — *G*, Gaz. — *GC*, Cup and cone. *H*, Ventre. — *I*, Ouvrages. — *L*, Laveur de gaz. — *M*, Manchon de refroidissement. *P*, Creuset. — *S*, Support de cuve. — *T*, Tuyère.

B. — *Chargement du haut-fourneau.* — Le haut-fourneau à fonte de fer dont nous nous occuperons exclusivement désormais est traversé d'une manière continue par deux courants circulant en sens inverse : l'un se compose de matières solides et du combustible chargés ensemble au gueulard, l'autre des gaz produits par la combustion.

Les matériaux solides chargés froids au gueulard comprennent le combustible, les minerais et les fondants. Ils sont versés par

charges de coke alternant avec des charges de minerais et de fondants (1).

Le gueulard est fermé par un appareil appelé *cup* and *cone*. Le cup est fixe et repose sur le haut de la maçonnerie de la cuve sans y être scellé afin de pouvoir se soulever en cas d'explosion. Le cone peut s'abaisser quand on veut introduire dans le haut-fourneau les charges versées au préalable dans le vide annulaire constitué par l'appareil fermé.

Par ce système d'introduction des charges, les gros morceaux tombent plutôt dans la région axiale du fourneau et les menus contre les parois.

Cette répartition des matières a pour but de s'opposer à une sortie trop rapide des gaz circulant dans le haut-fourneau ; ceux-ci s'échappant plus aisément par les parois.

Les fondants sont des substances d'addition dont le but est de déterminer la fusion de la gangue des minerais, sans perte du métal.

Supposons une gangue argileuse. On sait que les silicates doubles sont fusibles relativement aux silicates simples qu'on peut considérer comme infusibles. En ne chargeant dans l'appareil de réduction que du minerai et du charbon, la gangue ne pourrait se transformer qu'en silicate double d'alumine et de fer, et par conséquent ferait perdre une partie du métal. En ajoutant une base active, de la chaux par exemple, on déterminera la formation d'un silicate double d'alumine et de chaux et on évitera toute perte de métal. On ajoute généralement, au lieu de chaux, de la chaux carbonatée (et cela par économie) à laquelle on donne dans les usines le nom de *castine*.

Si la gangue est calcaire, on ajoutera de l'argile qu'on désigne aussi sous un nom spécial, celui d'*erbue*.

Si la gangue est purement siliceuse, ce qui est très rare, il faudra ajouter deux bases.

Si l'on possède un assortiment convenable de minerais, on peut se dispenser de l'emploi spécial d'un fondant, en mélangeant convenablement diverses espèces de minerais à gangue différente, de façon que ces gangues puissent donner lieu à la formation d'un silicate double fusible.

Souvent le fondant est un minerai stérile, c'est-à-dire très peu riche

(1) On appelle lit de fusion la masse de minerais et de fondants chargée dans le haut-fourneau en *proportions relatives déterminées*.

en fer, mais dont la gangue est, suivant le cas, riche en argile ou en chaux.

Les silicates fusibles qu'on obtient par ces mélanges dans le haut-fourneau, silicates renfermant peu d'oxydes métalliques, s'appellent **laitiers**.

Laitier et fonte tombent à l'état liquide dans le creuset du haut-fourneau où ils se superposent par ordre de densité; la fonte au fond du creuset, le laitier au-dessus.

Il sera fait allusion ultérieurement aux réactions subsidiaires qui s'y effectuent.

Le creuset a par suite deux trous de coulée bouchés par des tampons d'argile, l'un est au fond pour laisser la fonte s'échapper, l'autre est un peu au-dessous des tuyères pour se débarrasser des laitiers.

Il sera traité plus loin de la constitution si complexe des laitiers et du rôle si important qui leur revient dans la marche générale du haut-fourneau.

C. — *Alimentation d'air.* — L'air nécessaire à la combustion vient d'une machine soufflante et est injecté vers le bas du haut-fourneau par les tuyères qui débouchent dans l'ouvrage.

Plus la hauteur du fourneau sera grande, plus les charges qu'il contient comprimeront fortement, au niveau des tuyères, le mélange de combustible et de matières minérales, de sorte que l'introduction du vent deviendra d'autant plus difficile que le fourneau sera plus élevé et les matières plus menues et plus friables. De là, la nécessité de limiter la hauteur des fourneaux et de lancer le vent à des pressions d'autant plus fortes que l'appareil est plus élevé.

Pour des hauts-fourneaux marchant au charbon de bois ces pressions atteignent 8 à 10 centimètres de mercure; elles peuvent atteindre 20 à 30 centimètres quand ils marchent au coke ou à l'anthracite.

L'air lancé par la soufflerie ne va généralement pas comme autrefois directement aux tuyères, il y arrive aujourd'hui presque toujours chaud: pour cela, on le fait passer au préalable dans un appareil spécial déjà chauffé auquel il emprunte de la chaleur.

Ces appareils à air chaud, véritables récupérateurs de chaleur, très primitifs à l'origine de leur emploi, sont aujourd'hui assez perfectionnés. Ils peuvent se ramener à deux types principaux portant le nom de leurs inventeurs : le type *Whitwell* et le type *Cowper*.

Nous nous bornerons à en indiquer sommairement l'usage.

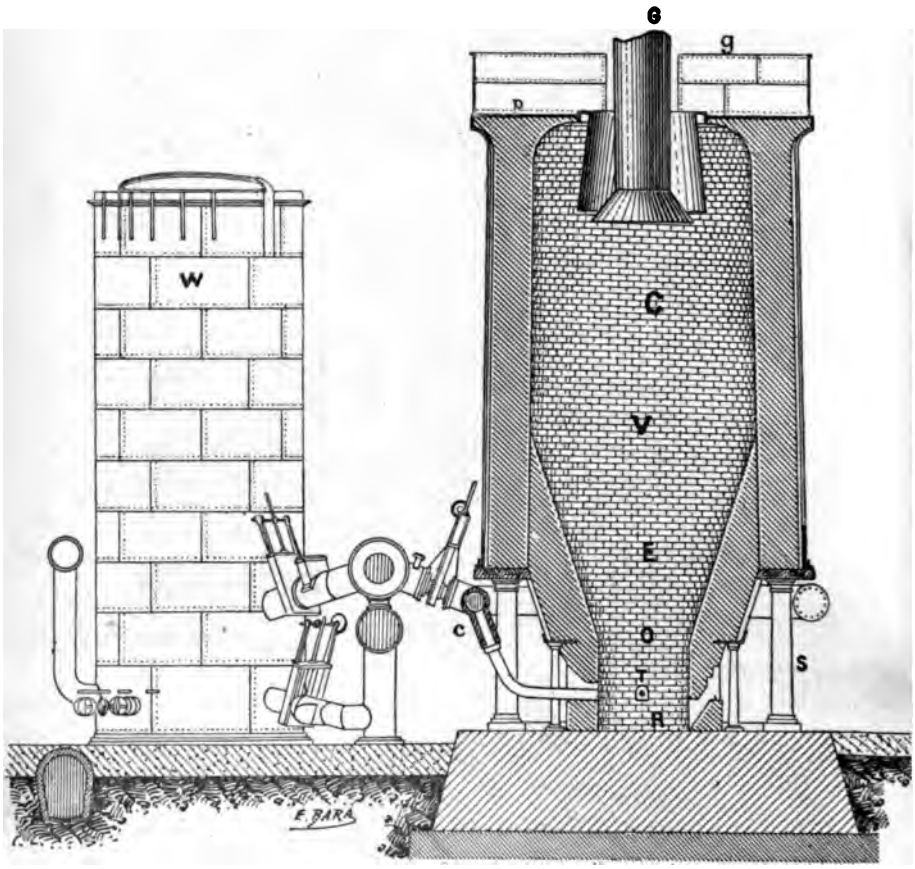


Fig. 17. — Haut-fourneau avec des appareils Whitwell le desservant.

C, Cuve. — *c*, Arrivée du vent chaud. — *E*, Etalages. — *G*, Prise de gaz centrale. — *g*, Galerie. — *O*, Ouvrage. — *p*, Plateforme de chargement. — *R*, Creuset. — *S*, Supports de cuve. — *T*, Trou de coulée.

Les gaz qui sortent du gueulard sont combustibles (1) ; ils renferment, en effet, une assez forte proportion d'oxyde de carbone. On les fait arriver dans un *appareil dit à air chaud* où on les enflamme, cette combustion s'effectuant dans un massif de matériaux réfractaires finit par l'échauffer considérablement. Les gaz brûlés après avoir circulé dans les divers conduits de l'appareil sont évacués à l'air libre par une cheminée d'usine. Il suffira quand un appareil a été chauffé d'inter-

(1) Une autre partie des gaz du gueulard sert à être brûlée sous les chaudières de la soufflerie.

cepter les communications avec les gaz du gueulard, avec la cheminée

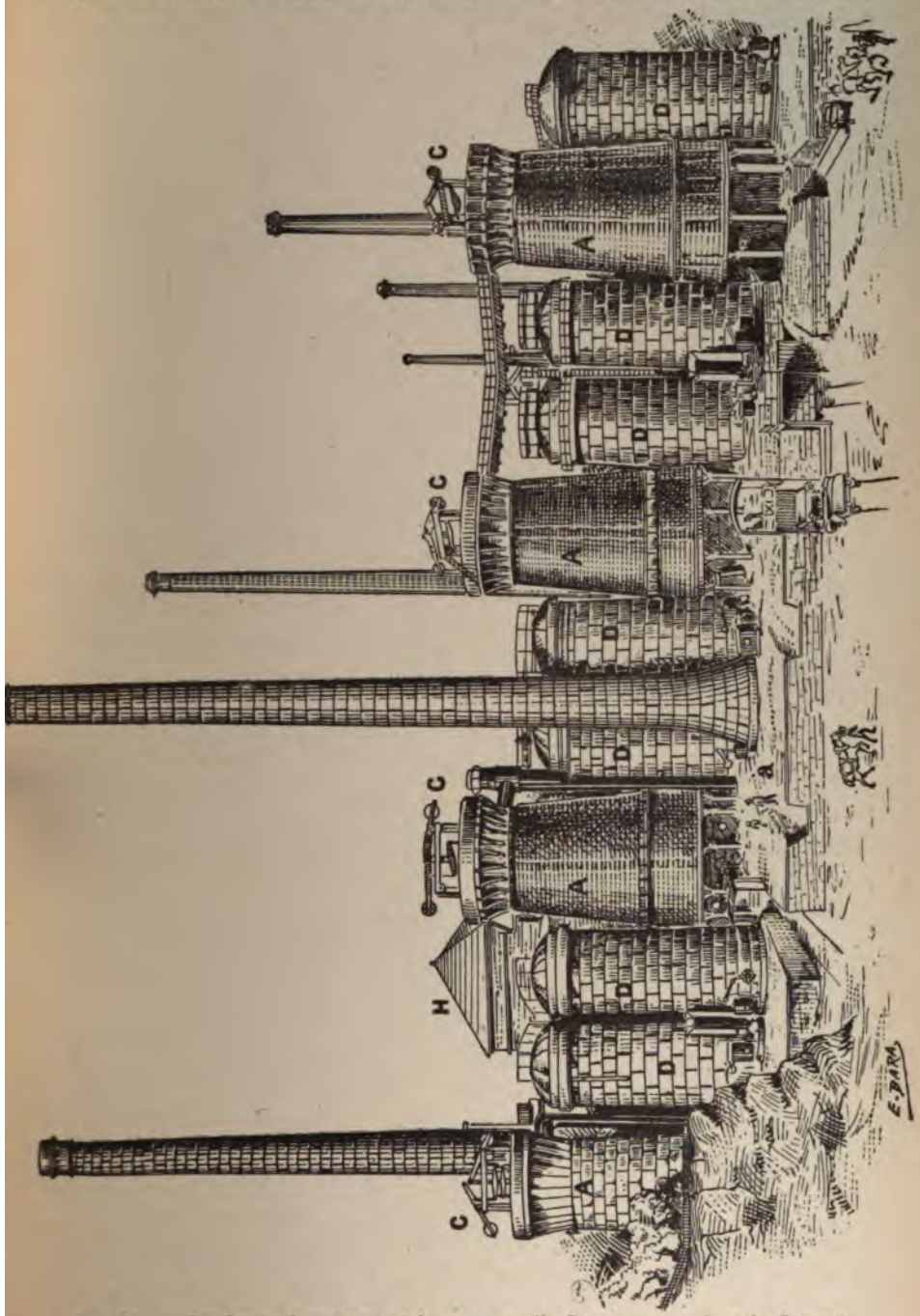


Fig. 18. — Les hauts-fourneaux et leurs appareils Cowper aux usines du Creusot.
A A A A, Hauts-fourneaux. — *C C C C*, Cup and cone. — *D D D D D D D*, Appareils Cowper. — *H*, Halle des machines soufflantes. — *a*, Aire de coulée.

et avec l'air libre qui entrait dans l'appareil pour déterminer la combustion et de le relier, d'une part, à la conduite de vent venant de la soufflerie et, d'autre part, à une conduite aboutissant aux tuyères. L'air parcourra le massif réfractaire déjà chaud, s'y échauffera et pourra arriver à une température variant de 500 à 700 ou 800° et même plus aux tuyères du haut-fourneau.

Mais pour qu'il n'y ait pas d'interruption dans la marche du fourneau, il faut au moins deux appareils identiques : l'un marchera au gaz, c'est-à-dire s'échauffera, tandis que l'autre déjà chauffé marchera au vent, c'est-à-dire cédera la chaleur qu'il a emmagasinée à l'air venant de la soufflerie.

En résumé, ainsi qu'on peut le voir sur la figure qui précède, toute installation de hauts-fourneaux nécessite l'aménagement *d'aires de coulée* de la fonte en avant des hauts-fourneaux, un nombre suffisant *d'appareils à air chaud*, puis une *soufflerie* disposée dans un bâtiment spécial et un certain nombre de têtes de voie ferrée (voie large ou étroite) aboutissant près des aires de coulée.

Des wagonnets transporteront aux appareils affineurs la fonte refroidie et cassée en morceaux, après sa coulée sur l'aire, ou la fonte reçue chaude dans une poche de fonderie.

D'autres wagonnets recevront les laitiers dès leur coulée ou après refroidissement et les transporteront au loin.

Nous terminons ici les notions générales pratiques qu'il était indispensable de connaître avant d'aborder l'étude théorique qui doit être consacrée aux réactions du haut-fourneau ; elles serviront de préface aux notions détaillées qui seront exposées dans la suite.

Remarque. — Il faut, pour avoir la fonte, débarrasser de son oxygène l'oxyde du minerai, puis débarrasser ce dernier de sa gangue ; d'où la nécessité d'établir les deux théories sur lesquelles reposent ces opérations : celle de la réduction des minerais d'une part, puis celle de la formation des laitiers, d'autre part.

Article 2. — Théorie de la réduction

Les métaux les plus usuels peuvent se ranger comme il suit dans l'ordre de leur affinité pour l'oxygène et la stabilité de leurs oxydes, les premiers étant les plus difficiles à réduire :

1° Chrome, manganèse ; — 2° zinc, fer; — 3° étain, cuivre, arsenic t antimoine, plomb; — 4° métaux précieux. Ces derniers forment des ›xydes décomposables par la chaleur seule.

Les métaux du troisième groupe se réduisent facilement soit par le arbone, soit par l'oxyde de carbone, l'hydrogène ou les gaz carburés ; eux du second groupe sont encore réduits par les gaz ; mais en pratique, u point de vue industriel, leur réduction complète ne s'obtient qu'avec e concours du carbone solide et d'une température assez élevée ; enfin, eux du premier groupe ne sont pas réduits par les gaz ; on ne peut les nettre en liberté que par l'action du carbone à très haute température.

Ce dernier point est à retenir ; nous verrons plus tard combien il est lifficile d'introduire du chrome, du manganèse,etc... dans une fonte de er en quantité assez notable.

A. — *Des agents réducteurs.* — Les agents réducteurs sont, comme ›n sait, le carbone, l'oxyde de carbone, l'hydrogène et les hydrocar- ›ures produits par la distillation ou la combustion incomplète des com- bustibles.

Les métaux oxydables peuvent aussi être utilisés pour décomposer les oxydes d'autres métaux : on se sert du manganèse pour réduire au rouge ou aux hautes températures l'oxyde de fer, on se sert également du silicium, de l'aluminium. Ces réactions sont mises à profit dans les procédés d'élaboration des aciers.

Faisons abstraction, dans le cas qui nous occupe, du rôle désoxy- dant de ces métaux ; et ne considérons que le *carbone* et *les gaz* comme agents réducteurs.

Dans le cas spécial du haut-fourneau, le carbone est chargé, comme on l'a vu, dans le four en forte proportion ; il figurera comme agent ré- ducteur primordial, mais il y aura aussi de l'oxyde de carbone. Le car- bone brûle aux tuyères ; il y a donc formation d'oxyde de carbone par dissociation de l'acide carbonique rencontrant inévitablement du charbon incandescent.

Pour une autre raison, il y aura forcément de l'oxyde de carbone dans le fourneau. On va voir, en effet, qu'il est engendré par l'action réduc- trice du charbon sur les oxydes. Nous examinerons plus loin le détail de ces phénomènes ; pour le moment enregistrons les faits.

1° *Réduction par le carbone.* — Examinons tout d'abord, d'une façon générale, le rôle joué par le carbone comme réducteur.

a Métaux réfractaires. — Quand les métaux ne sont réduits par le carbone qu'à haute température, CO^2 ne pouvant subsister en présence de C porté au rouge, la réaction suivante indique comment s'opère la réduction, M représentant le symbole d'un métal quelconque :

$$(1)\quad 2MO + 2C = 2M + 2CO$$

D'où, mise en liberté du métal avec production d'oxyde de carbone.

b Métaux facilement réductibles. — Quand les métaux sont réduits par le carbone à basse température, la réaction suivante indique comment s'opère la réduction :

$$(2)\quad 2MO + C = 2M + CO^2.$$

D'où mise en liberté du métal avec production carbonique.

Comparée à la formule (1), la formule (2) fait voir qu'étant donné le même poids de minerai 2MO, on consommera moins de charbon dans le second cas que dans le premier. — Or, on a vu plus haut que le fer est à la limite des métaux réfractaires et des métaux réductibles : il peut donc théoriquement se réduire en partie d'après la formule (2); mais en pratique on n'arrive pas à une réduction complète sans production d'oxyde de carbone.

2° *Réduction par les gaz.* — Les oxydes des métaux réductibles peuvent aussi être décomposés par H ou par CO.

Nous ferons abstraction du rôle joué par l'hydrogène dans les réactions du haut-fourneau, ce rôle n'est pas bien connu. Selon toute apparence, il doit s'y comporter comme un métal : nous verrons au sujet des gaz contenus dans les métaux ferreux que ce corps est occlus dans les aciers et dans les fontes, même à froid.

L'action réductrice de l'oxyde de carbone sur l'oxyde de fer commence à des températures variables, suivant la nature physique du minerai : faible à 140°, elle est active à 200° sur les carbonates grillés. Avec l'accroissement de la température et de la vitesse du courant gazeux cette réaction devient plus énergique : à 400° elle s'exerce sur tous les minerais.

On vient de dire que l'intensité de cette réaction était fonction de la vitesse du courant gazeux ; et en effet, il y a nécessité absolue de chauffer les oxydes à réduire dans un courant de gaz assez fort pour balayer immédiatement les produits de la réaction.

Si la vapeur d'eau ou CO^2 engendrés séjournaient sur le métal ıauffé au rouge, ils l'attaqueraient et régénéreraient de l'oxyde.

On ne peut décomposer dans les laboratoires l'oxyde de fer par H ou ır CO dans des tubes de porcelaine qu'en produisant un courant rapide : ces gaz; c'est-à-dire en se servant d'un mélange où l'élément réduc-ur est toujours en *grand excès* relativement à CO^2 et à la vapeur d'eau ·ovenant de la réaction.

Cette réaction sera par suite contrariée dans le haut-fourneau par la :action inverse de CO^2 sur le fer réduit, qui régénère CO.

Cette réaction nulle à 300° est active à 417° et très intense au rouge.

En faissant passer sur un minerai de fer un courant lent de CO il y urait d'abord réduction, puis viendrait un moment où l'atmosphère ontiendrait assez de CO^2 pour que les réactions inverses se compensent, es 2 phénomènes ayant à peu près lieu à la même température. Il y ıurait équilibre et la réduction ne serait pas poussée plus loin.

Il résulte de ce qui précède que la réduction par CO ne sera jamais complète et qu'il faudra compter sur l'action du carbone solide pour réduire tout à fait le minerai. L'Ingénieur de haut-fourneau devra néanmoins s'efforcer de la réaliser, et l'on peut dire que dans les régions du fourneau où les conditions sont favorables, le métal sera aussi mis en liberté comme l'indique la formule suivante :

$$(3)\quad 2MO + 2CO = 2M + 2CO^2.$$

3° *Application générale aux minerais de fer.* — Appliquant les formules (1), (2) et (3) aux minerais de fer en supposant que le minerai traité ne contient que du peroxyde, nous aurons :

$$(1)\quad 2Fe^2O^3 + 6C = 6CO + 4Fe$$
$$(2)\quad 2Fe^2O^3 + 3C = 3CO^2 + 4Fe$$
$$(3)\quad 2Fe^2O^3 + 6CO = 6CO^2 + 4Fe$$

Ces trois formules ne sauraient être considérées comme donnant la solution complète du problème de la réduction : les réactions traduisant le phénomène ne pouvant être que fort complexes. La transformation finale est le résultat d'un équilibre s'établissant entre elles et dont l'importance relative change avec la marche générale du fourneau et la composition de la charge.

La réaction (3) s'effectue sensiblement *sans absorption ni dégagement de chaleur, elle en produit plutôt.*

La réaction (1) absorbe environ 1500 calories par kilogramme d'oxygène enlevé au minerai et la seconde 2700. — L'avantage d'opérer la réduction sur des minerais passés à l'état de peroxyde est manifeste, à cause de l'économie de combustible réalisée. La réduction des oxydes magnétiques par l'oxyde de carbone ne commence, en effet, qu'à des températures plus élevées : dans la cuve du haut-fourneau, ces minerais parviennent presque intacts dans la zone où l'oxyde de carbone n'agit plus et où seul le carbone intervient.

Wiborgh et Kosmann ont fait des expériences consistant à traiter des minerais par des courants de CO sous l'influence de la chaleur : ils ont obtenu en partant de Fe^2O^3 des composés renfermant 45 à 55 0/0 de fer libre; tandis qu'en partant de Fe^3O^4 ils ont obtenu des produits renfermant 9 à 19 0/0 de fer libre seulement (Stahl und Eisen 1888). Nous verrons, en outre, et ultérieurement, qu'il y a intérêt à provoquer la réaction de la décomposition de l'oxyde de carbone suivant la formule : $2CO = C + CO^2$. Cette réaction singulière, d'origine si mystérieuse et sur laquelle nous donnerons des développements détaillés a été découverte par sir *Lowthian Bell* et étudiée par *Gruner*. Or, cette réaction est beaucoup plus active sur l'oxyde Fe^2O^3 que sur les oxydes magnétiques ou à un état inférieur d'oxydation.

B. — *Etude du phénomène de réduction dans le haut-fourneau.* — Il y a dans le haut-fourneau deux courants inverses et réagissant l'un sur l'autre : un courant gazeux ascendant et un courant solide descendant.

Le premier courant est engendré par la combustion auprès des tuyères : sa température d'abord très élevée décroît progressivement jusqu'au gueulard par la cession graduelle de sa chaleur propre aux matériaux solides du courant descendant.

Le second courant est composé du combustible, des minerais et des fondants : ces matières s'échauffent, se frittent puis se fondent et se réduisent sous l'action du courant gazeux.

De ces deux courants, le 1er est rapide, il parcourt plus de un mètre par seconde : le 2e est lent, sa vitesse est le plus souvent de moins de un mètre par heure.

1° *Courant gazeux ascendant.* — Supposons le haut-fourneau en feu : le vent venant de la soufflerie arrive par les tuyères au contact d'un mélange incandescent de charbon et de matière minérale.

Dans les anciens hauts-fourneaux, la tuyère lançait de l'air froid : ce vent devait, après son introduction dans le fourneau, parcourir un certain espace pour s'échauffer avant de pouvoir réagir sur le charbon par son oxygène. Cet espace non négligeable constituait la *zone préparatoire.*

Dans les hauts-fourneaux actuels, le vent est toujours chaud et porté le plus généralement à une très haute température : il en résulte que la zone préparatoire est fortement réduite ou même nulle.

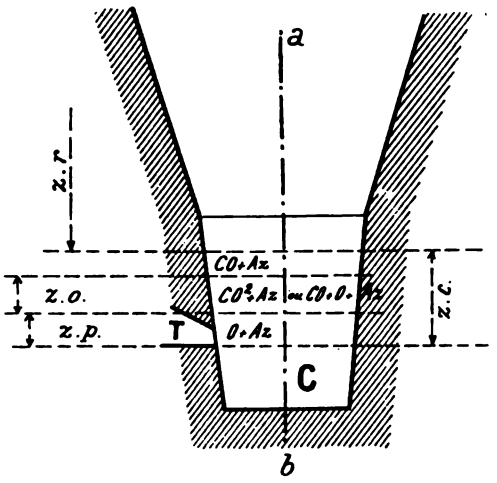


Fig. 19.

C, Creuset.
z. o, Zone oxydante.
z. p, Zone préparatoire.
z. r, Zone réductrice.
z. c, Zone de combustion.

Que ce soit presque au niveau des tuyères ou un peu au-dessus, l'air (O + Az) se combinera avec le carbone incandescent et donnera un courant gazeux composé d'acide carbonique et d'azote (CO^2 + Az). Cette réaction s'accomplira dans un espace qu'on a désigné sous le nom de *zone oxydante.*

Dans les hauts-fourneaux à fonte de fer où la proportion de combustible est relativement forte (1/3 *de la charge au minimum*), CO^2 ne pourra subsister : on n'ignore pas, en effet, que CO^2 en présence du carbone à haute température est dissocié. (Expériences d'H. Sainte-Claire-Deville et Debray).

Par suite, on ne trouvera dans ces appareils au voisinage des tuyères non pas CO^2 + Az, mais CO + O + Az ou CO + Az, car l'oxygène libre se combine avec le carbone pour donner CO. .

Dans les fours à cuve où la charge en combustible est relativement faible comme dans les appareils à dimensions réduites servant, par exemple, à refondre la fonte *(cubilots)*, le carbone sera en proportion insuffisante pour réduire complètement l'acide carbonique et même pour absorber d'une manière intégrale l'oxygène de l'air.

Le courant gazeux sera donc oxydant au voisinage des tuyères. —

C'est le cas des appareils de deuxième fusion appelés cubilots qu'on a cités, de certains fours à manche employés dans la métallurgie des métaux autres que le fer, etc., etc...

Dans les cubilots, les fontes arrivant en fusion dans cette zone oxydante y sont généralement adoucies, à cause du départ par oxydation et passage consécutif au laitier d'une certaine proportion des corps étrangers qu'elles contiennent.

Il y a lieu de savoir que dans un cubilot, à la fonte à refondre on associe le coke dont la combustion donnera la chaleur nécessaire à la fusion et une certaine quantité de fondant *(la chaux ordinairement)* pour éliminer en laitier les cendres et diverses impuretés du combustible.

a) Température de la zone de combustion. — Elle dépend de nombreux facteurs parmi lesquels on peut citer : la nature du combustible, l'humidité plus ou moins grande de l'air injecté, la hauteur de la zone elle-même.

Plus la zone sera haute moins la température sera élevée, car le même nombre de calories sera réparti sur une plus grande hauteur. Or, la hauteur de la zone dépend de la rapidité avec laquelle les réactions s'effectuent, cette rapidité étant fonction de la nature du combustible, de la pression dans l'ouvrage, de la température du vent.

La température dans cette région où l'oxygène de l'air injecté se combine au carbone ne dépasse pas 1700 à 1800°. C'est là que règne la température la plus élevée du fourneau.

Au sortir de la zone de combustion la température du courant gazeux sera notablement abaissée, car la transformation de CO^2 en $2CO$ s'est faite avec une forte absorption de chaleur.

La zone de combustion correspond à peu près à la hauteur de l'ouvrage tout en lui restant plus ou moins inférieure selon le cas. Au-dessus, commence la *zone de réduction*.

b) De l'importance du rapport. $\frac{CO^2}{CO}$ — CO se transforme en CO^2 par la réduction des oxydes métalliques et notamment de l'oxyde de fer à mesure que les gaz s'élèvent au travers du minerai. D'autre part CO^2 pourra être ramené à l'état de CO au contact du charbon si la température est suffisante. Aussi, au gueulard trouve-t-on toujours un mélange de ces deux gaz.

L'expérience a montré que la réduction ne sera complète au niveau

les tuyères que si le rappport $\frac{CO^2}{CO}$ ne dépasse guère en poids un maximum de 0,70 à 0,80; sauf dans des circonstances particulières caractérisées, par exemple, par une forte consommation de castine. Dans ce cas, la majoration de la valeur du rapport $\frac{CO^2}{CO}$ proviendra de la décomposition de ce fondant carbonaté.

La décomposition des minerais de fer carbonatés pourra également contribuer à cette majoration dans une certaine mesure.

Disons même, à ce propos, que le traitement direct des carbonates de fer au haut-fourneau entraîne l'absorption d'une grande quantité de chaleur : les carbonates de fer exigeant en moyenne pour leur décomposition près de 259 calories par kilogramme. Il y a lieu d'ajouter que cette décomposition ne s'achève que dans les zones chaudes du fourneau, l'oxyde de fer mis en liberté étant réduit avec production d'oxyde de carbone au lieu d'acide carbonique.

De là, résulte une certaine diminution dans la majoration indiquée ci-dessus.

Quant à la valeur de 0,7 à 0,8 du rapport $\frac{CO^2}{CO}$ pour réaliser une bonne réduction, elle ne s'applique qu'au cas des hauts-fourneaux marchant au coke; nous ferons une restriction au sujet des hauts-fourneaux marchant au charbon de bois.

c) De la marche idéale du haut-fourneau. — La réaction réductive $2Fe^2O^3 + 6CO = 6CO^2 + 4Fe$ est de beaucoup la plus avantageuse, on l'a dit; et cela parce qu'elle se produit avec une très faible absorption de chaleur.

Si elle se réalisait seule, c'est-à-dire si la réduction de l'oxyde de fer se faisait uniquement par la transformation de CO en CO^2, on serait arrivé à ce qu'on peut appeler la *marche idéale* du fourneau. Dans ce cas, CO produit auprès des tuyères réduirait le minerai en se transformant en CO^2 qui sortirait du gueulard sans avoir réagi sur le charbon solide des charges; et alors tout le charbon chargé traverserait le haut-fourneau sans autre altération qu'un échauffement graduel, avant de venir finalement se brûler en CO sous l'action du vent des tuyères.

Comme la réduction de l'oxyde de fer par CO est celle qui se fait à la plus basse température, on se rapprochera de la marche idéale quand la réduction se fera dans une région du fourneau où la température

sera relativement faible. On évitera ainsi que le CO^2 engendré reforme constamment CO aux dépens du charbon solide.

« De là, la nécessité d'avoir des fourneaux vastes et élevés et de « réaliser un courant gazeux rapide pour ne pas laisser CO^2 trop long- « temps au contact du charbon solide. »

Le grillage des minerais carbonatés dans des appareils spéciaux à *chauffage économique* est donc à recommander puisque nous savons que leur oxyde est mis en liberté intégrale dans une zone chaude du haut fourneau et que cette réduction *se fait avec production d'oxyde de carbone au lieu d'acide carbonique.*

Dans une étude du plus haut intérêt (Bulletin de la Société d'Encouragement, 1897) MM. les ingénieurs de Billy et Julhiet font remarquer, en analysant l'étude de M. le professeur Wedding sur le grillage des minerais, que, soumis à la chaleur, le carbonate de fer dégage un mélange d'oxyde de carbone et d'acide carbonique. Suivant que l'opération est conduite à l'abri de l'air ou avec un accès d'air plus ou moins grand, l'oxyde restant est une variété d'oxyde magnétique (Fe^6O^7 ou Fe^3O^4), ou du sesquioxyde Fe^2O^3. Comme c'est ce dernier oxyde qu'il y a intérêt à obtenir pour des raisons antérieurement données, il convient donc de soumettre les carbonates à un grillage modéré, avec large accès d'air.

Rappelant les travaux de M. le professeur Jordan sur la question, MM. de Billy et Julhiet exposent que cette manière d'opérer, si elle procure des économies au haut-fourneau, est aussi plus avantageuse au four de grillage, car la chaleur d'oxydation compense à peu près exactement la chaleur de décomposition du carbonate. Dans les fours modernes convenablement agencés, on est parvenu à griller les carbonates de Bilbao avec des consommations de combustible variant de 4 à 6 pour mille du poids de minerai traité.

Ainsi se complètent peu à peu les notions que nous avons données plus haut au sujet du grillage des minerais.

La température du vent exerce aussi sur la marche du haut-fourneau une influence considérable. Grâce à la chaleur qu'il apporte, on peut diminuer la dépense de combustible tout en maintenant constante la température aux tuyères et la quantité totale de chaleur fournie à l'appareil.

Il en résulte une localisation des hautes températures et une production moindre de gaz et, par conséquent, un abaissement de la tempéra-

ture au gueulard favorable à une réduction par CO aussi complète que possible : $\frac{CO^2}{CO}$ ira en augmentant.

« Par suite, l'emploi du vent surchauffé, en dehors de l'économie « de combustible réalisée, fera approcher aussi de l'allure idéale. »

Mais il y a une limite à cette surélévation de la température, car, dès que la proportion de CO^2 augmente, la réaction de ce gaz sur C tend à augmenter aussi et par conséquent la proportion de C brûlée dans la cuve s'élèvera, de sorte que l'économie réalisée dans la région des tuyères se trouvera de ce fait neutralisée.

d) De la réaction $2CO = C + CO^2$ au voisinage du gueulard. — Cette réaction se produit au contact des sous-oxydes ou du fer réduit.

Le second membre de la formule $2CO = C + CO^2$ n'indique que le résultat final du dédoublement de CO ; selon toute apparence, CO pour se dédoubler passe par une série de combinaisons avec l'oxygène et probablement avec le fer, combinaisons dont la genèse nous est encore inconnue.

Découverte par sir Lowthian Bell, ainsi qu'il a été déjà dit, cette réaction a été spécialement étudiée par ce savant et par Gruner ; elle joue un grand rôle dans les transformations du minerai.

Cette action est concomitante de celle qu'exerce la réduction du minerai par CO, quoiqu'elle paraisse indépendante de l'action réductrice de CO.

Le rapport du poids d'oxygène réduit au poids du carbone déposé ne paraît, en effet, dépendre d'aucune loi.

Si on fait passer sur de l'oxyde Fe^2O^3 un courant renfermant des volumes égaux de CO et CO^2, le dépôt de carbone n'a pas lieu, il tend à se produire du protoxyde FeO. Le dépôt de carbone ne commence que sous l'influence d'un courant renfermant en volumes : 2 de CO pour 1 de CO^2, correspondant à un rapport en poids : $\frac{CO^2}{CO} = 0,79$. Ce dépôt peut être extrêmement abondant, il semble augmenter beaucoup avec la vitesse du courant gazeux.

Un courant de CO passant à 410° sur du fer parfaitement réduit produit au bout d'un certain temps un dépôt de carbone pouvant s'élever à 20,3 0/0 du poids du fer ; mais, d'une manière générale, la réaction est moins vive qu'avec l'oxyde de fer.

La réaction paraît commencer vers 200° mais n'est guère nette avant

240° ; entre 400 et 450° elle atteint son maximum d'intensité, puis elle s'affaiblit ; au rouge elle est peu active, sans pourtant cesser complètement.

L'acide carbonique ne provoque aucun dépôt de ce genre, ni sur le fer à l'état métallique, ni sur ses oxydes.

e) *Entraînement de poussières par la colonne gazeuse.* — Les gaz entraînent aussi des poussières, ils contiennent souvent des vapeurs métalliques formées devant les tuyères ; ces vapeurs peuvent se réoxyder près du gueulard au contact de la vapeur d'eau entraînée et de CO^2 qui devient plus abondant. Les oxydes formés sont entraînés en partie, mais une portion se dépose au gueulard.

On nomme ces dépôts *cadmies ;* ils contiennent surtout de *l'oxyde de plomb et de l'oxyde de zinc ;* la coloration des cadmies est due à la présence de l'oxyde de fer.

Enfin, il y a des poussières de charbon, de cendres, de chaux, de manganèse, etc...

Nous reviendrons ultérieurement sur les inconvénients qui résultent de l'entraînement des poussières par la colonne gazeuse.

2° *Courant solide descendant.* — La consommation du combustible dans l'ouvrage détermine la descente des charges dans la cuve. Le courant descendant se compose de matières solides, combustible et lit de fusion, qu'on charge au gueulard par couches alternatives.

Ces matières s'échauffent aux dépens du courant gazeux ascendant, et en même temps elles réagissent, soit sur les gaz, soit entre elles, de façon à former des combinaisons variées. D'après la nature de ces réactions, on peut diviser le four en cinq zones qui sont de haut en bas :

a) La zone de calcination (partie supérieure de la cuve) ;
b) La zone de réduction (bas de la cuve, ventre) ;
c) La zone de fusion (étalages) ;
d) La zone de combustion (ouvrage) ;
e) La zone de liquation (creuset).

a) *Zone de calcination.* — Dans la première zone, le lit de fusion commence à s'échauffer et perd des matières volatiles : eau contenue dans le minerai ou les fondants ; acide carbonique de certains carbonates ; hydrocarbures contenus dans le combustible, etc...

La réaction $2CO = C + CO^2$ qui se produit au voisinage du gueulard

dégage, en effet, 3134 calories par kilogramme de carbone déposé. Le gueulard est donc une zone *de dégagement de chaleur*. Mais cette chaleur est absorbée par l'élévation de la température de la charge, par la vaporisation de l'humidité qu'elle renferme, par la décomposition des hydrates et parfois par la décomposition des carbonates : phénomènes que nous avons signalés ci-dessus.

La combinaison des oxydes FeO et Fe^2O^3 avec l'eau s'effectue avec absorption de chaleur, il en résulte que la décomposition des hydrates $FeO\,H^2O$ ou $Fe^2O^3 3H^2O$ est facile. La température à laquelle la réaction commence est assez faible et la quantité de chaleur absorbée par le changement d'état de l'eau est en grande partie compensée par celle que dégage la décomposition de l'hydrate.

« Sous l'influence de la réaction $2CO = C + CO^2$, dit Gruner dans ses « Etudes sur les hauts-fourneaux, le minerai pénétré par les gaz réduc- « teurs se fissure dans tous les sens, foisonne beaucoup, et se couvre de « carbone pulvérulent, sorte de carbone ferrugineux, véritable composé « de carbone et de fer, tenant au maximum 5 à 7 0/0 de fer métallique, « et renfermant toujours aussi une faible dose de fer oxydé, en majeure « partie magnétique, dont le rôle semble essentiel à la réaction qui « provoque ce dépôt de carbone. »

A mesure que les charges descendent, leur température s'élève.

b) *Zone de réduction.* — La deuxième zone commence là où la température du courant solide atteint celle où la réduction peut se faire, c'est-à-dire en général le rouge faible.

Le carbone déposé et provenant de la réaction $2CO = C + CO^2$ disparaît peu à peu, brûlé par l'acide carbonique.

La réduction se produit d'abord sous l'influence de CO d'après la réaction indiquée par la formule : $2Fe^2O^3 + 6CO = 4Fe + 6CO^2$, puis sous celle du carbone solide, coke ou carbone *d'imprégnation* d'après la réaction indiquée par la formule : $2Fe^2O^3 + 3C = 4Fe + 3CO^2$.

Le carbone d'imprégnation est celui qui provient de la décomposition que traduit la formule $2CO = C + CO^2$.

La part à attribuer dans la réduction à ces deux réactions devient de plus en plus faible au fur et à mesure que les charges descendent, car la haute température et la présence du coke incandescent ne permettent pas à CO^2 de subsister en proportion notable.

Dès lors, il ne peut plus se former que CO et la réduction s'achève sous l'influence du carbone solide d'après la réaction :

$$2Fe^2O^3 + 6C = 4Fe + 6CO$$

En même temps que s'effectue la réduction du minerai, une autre réaction importante se passe dans cette région du fourneau : *la décomposition de la castine.* Le carbonate de chaux ne se décompose complètement qu'à haute température, et sa décomposition ne s'achève probablement que dans la zone où s'achève aussi la réduction du minerai c'est-à-dire au rouge vif, et une grande partie de l'acide carbonique dégagé est aussitôt décomposée par le carbone pour se transformer en CO.

M. l'ingénieur des mines de Billy dans son traité de « *fabrication de la fonte* » résume d'une façon remarquable le mécanisme de ces différentes transformations. Voici comment :

La réaction dont il vient d'être question absorbe 3050 calories par kilogramme de carbone consommé. Quand elle s'effectue aux dépens de l'acide carbonique résultant de la réduction du minerai, tout se passe comme si le minerai avait été réduit directement par C, d'après la réaction : $2Fe^2O^3 + 6C = 4Fe + 6CO$.

Il y a donc lieu, au point de vue de l'économie du combustible, d'avoir au voisinage du gueulard une zone à température modérée aussi étendue que possible ; on réduira ainsi au minimum l'importance de la réduction directe par C et de l'action de C sur CO^2.

Quant à l'allure idéale, elle est pratiquement irréalisable ; mais le dédoublement de CO d'après : $2CO = CO^2 + C$ en rapproche l'allure ordinaire. Le carbone pulvérulent provenant de cette réaction descend, comme on l'a dit, avec la charge réduisant en partie le minerai avec lequel il est mélangé. Le gaz ainsi produit est de nouveau dédoublé en $1/2C + 1/2CO^2$ et ainsi de suite ; de sorte que tout se passe comme si le gaz primitif 2CO avait été transformé en $2CO^2$ par l'O du minerai. Il y a pourtant une différence : c'est que la chaleur engendrée par la réaction $2CO = CO^2 + C$ se dégage trop près du gueulard pour donner une aussi bonne utilisation que si elle était engendrée dans les zones plus basses, comme dans l'allure idéale.

c) Zone de fusion. — La réduction s'achève dans cette zone exclusivement par le carbone du combustible qui passe à l'état de CO.

Le fer réduit en présence du coke incandescent s'unira à une certaine quantité de carbone ; il se cémentera et se présentera alors sous la forme d'une masse spongieuse fortement carburée tenant encore une proportion de 4 à 6 0/0 de sa teneur primitive en O qui ne se dégagera

que progressivement. La silice des cendres du combustible et des gangues se combine avec les fondants qui se ramollissent et fondent complètement à la partie inférieure de la zone en formant des laitiers.

Il est clair qu'il y a lieu d'appliquer plus ou moins complètement les considérations précédentes à la réduction des oxydes métalliques ou autres accompagnant en proportion plus ou moins notable l'oxyde de fer dans le minerai. On trouvera donc finalement un métal composé en majeure partie de fer (*si l'oxyde de fer domine dans le minerai*), ayant forcément du carbone mais aussi du manganèse, du silicium, etc... selon la composition du lit de fusion, l'allure du fourneau, etc... Ce métal est **la fonte.**

d) *Zone de combustion.* — Dans cette zone les matières chauffées au rouge vif arrivent devant les tuyères : tout le carbone qui n'a pas été oxydé aux dépens du minerai dans les régions supérieures s'y brûle, comme on l'a antérieurement expliqué.

Le métal et les laitiers traversent cette zone rapidement, sous forme de gouttelettes fondues : c'est là qu'il se produit des vapeurs qui se mêlent au courant gazeux et vont se réoxyder au gueulard, ainsi qu'il a été dit plus haut.

e) *Zone de liquation.* — Une fois dans le creuset les laitiers se séparent, forment une couche liquide au-dessus du bain de métal fondu et le protègent contre la volatilisation ; il ne se produit plus que quelques réactions secondaires entre ces deux couches. Les métaux les plus oxydables que contient la fonte tendent à passer aux laitiers et à s'y substituer à ceux qui ont moins d'affinité pour l'oxygène.

Article 3. — Théorie de la formation des laitiers

Le laitier se forme, comme on sait, par la combinaison de la gangue des minerais avec les cendres du combustible et avec les matières d'addition dites *fondants*.

Les laitiers ne sont pas des combinaisons définies ; ce sont, en grande partie, des mélanges de silicates et de sulfures dont la composition est fonction de l'allure du fourneau, de la nature des corps mis en présence, etc... Ils ne possèdent pas, par suite, des points de fusion nettement déterminés ; ces points de fusion varient d'une façon continue avec leur composition.

Nous supposons d'abord pour simplifier notre étude que nous n'avons en présence que trois corps : *la silice, l'alumine* et *la chaux.* — Ces trois corps sont les trois corps constituant les laitiers ; nous leur adjoindrons ensuite les bases métalliques, *oxydes de fer* et *de manganèse*, puis la *magnésie* et *la baryte*. Nous dirons enfin quelques mots des sulfures qui se rencontrent dans les laitiers.

I. — *Laitiers à silice, alumine et chaux.*

A. — *Fusibilité des laitiers.* — Les trois corps considérés que nous avons appelés corps constituants des laitiers s'unissant entre eux à l'état de silicates, il importe de donner un aperçu sur les lois générales de leur fusibilité.

Et d'abord soit $\frac{m}{n}$ le rapport entre les poids de l'oxygène de l'acide et de l'oxygène de la base d'un silicate. Prenons, par exemple un silicate tribasique de chaux ; sa formule sera $3nCaO,mSiO^3$.

On appellera *protosilicates*, *sesquisilicates*, *bisilicates*, etc... les silicates dans lesquels le rapport $\frac{m}{n}$ de l'oxygène acide à l'oxygène basique vaut 1, $\frac{3}{2}$, 2, etc... ; si ce rapport est inférieur à 1, on aura des *sous-silicates*.

Les *silicates acides* sont ceux pour lesquels $\frac{m}{n}$ est élevé, les basiques sont ceux pour lesquels $\frac{m}{n}$ est faible.

Les règles concernant la fusibilité des silicates présentent un caractère assez précis, elles sont au nombre de trois principales. Nous aurons à les faire intervenir en maintes occasions dans l'étude des procédés d'élaboration des fers et des aciers :

1° SILICATES FORMÉS D'UNE BASE FUSIBLE	2° SILICATES FORMÉS D'UNE BASE INFUSIBLE	3° SILICATES A BASES MULTIPLES
Un silicate formé d'une base fusible est d'autant plus fusible qu'il renferme une plus grande quantité de base.	La fusibilité a son maximum pour les silicates compris entre les bi et les trisilicates.	Pour un même rapport entre la teneur en O de l'acide et des bases, les silicates sont d'autant plus fusibles qu'ils renferment un plus grand nombre de bases.

Cela posé, le laitier sera fusible selon les proportions relatives des trois corps constituants *silice*, *alumine* et *chaux* et la nature des silicates formés.

1° TENEUR EN SiO^3	2° TENEUR EN Al^2O^3	3° TENEUR EN CaO
La teneur en SiO^3 varierа entre 30 et 60 0/0. Le degré d'acidité varie alors du proto au trisilicate. Les bisilicates correspondant à peu près au maximum de fusibilité ont une teneur en SiO^3 variant de 45 à 50 0/0.	Al^2O^3 plus que CaO tend à rendre les laitiers réfractaires, il en faut donc très peu mais assez cependant pour que le laitier ne se rapproche pas trop d'un silicate simple. Jusqu'à une teneur de 17 0/0, Al^2O^3 se comporte comme une base ; au delà, elle joue le rôle d'acide, les laitiers sont alors des silico aluminates. La teneur en Al^2O^3 sera : 18 0/0 au maximum 10 à 12 0/0, en général, 8 au minimum.	La proportion de CaO varie de 20 à 50 0/0. Le rapport $\frac{CaO}{Al^2O^3}$ sera compris entre 2 et 3 0/0. M.U. Le Verrier auquel nous empruntons un grand nombre de ces considérations pratiques indique pour le maximum de fusibilité les proportions suivantes : $SiO^3 = 45$ 0/0; CaO = 40 0/0 : $Al^2O^3 = 15$ 0/0. Les laitiers seront plus réfractaires selon qu'on augmentera Al^2O^3 ; ils seront en même temps basiques si on augmente CaO.

En résumé, pour une bonne fusibilité des laitiers :

— SiO^3 variera entre 30 et 60 0/0
— Al^2O^3 — 8 et 18 0/0
— CaO — 20 et 50 0/0
— $\frac{CaO}{Al^2O^3}$ — 2 et 3 0/0

B. — *Propriétés des laitiers.* — Les laitiers acides, c'est-à-dire ceux qui ont plus de 40 0/0 de SiO^3 ont une structure vitreuse après refroidissement.

A la coulée, ils s'échappent lentement comme le verre, se refroidissant aussi peu rapidement que lui : leur chaleur spécifique est considérable.

Ces laitiers peuvent s'étirer, avant que le refroidissement ne soit trop avancé, en fils assez longs.

Quand la proportion de silice augmente, ils restent vitreux et deviennent plus visqueux en coulant par suite très difficilement.

Les laitiers basiques, c'est-à-dire ceux qui ont moins de 40 0/0 de SiO^3 ont une structure pierreuse s'ils sont principalement calcaires ; porcelanique, s'ils renferment de l'alumine : ils ont une moindre chaleur spécifique et se figent rapidement.

Quand ils sont fondus, ils sont très fluides surtout quand à la silice, à l'alumine et à la chaux viennent s'adjoindre des oxydes métalliques (*Mn ou Fe*).

On les appelle courts parce qu'on ne peut les étirer en fils.

Quand ils sont très calcaires, c'est-à-dire pour une teneur de 55 0/0 de chaux, ils tombent en poussière après refroidissement sous l'action de l'air humide. On dit alors qu'ils *fusent*. Ils se figent au sortir de l'ouvrage et tombent en gouttes séparées ou se figent instantanément au contact du ringard; souvent même, s'ils deviennent trop basiques en cas de dérangement d'allure, on est obligé de les enlever à la pelle dans le creuset.

S'ils ne renferment pas d'oxydes métalliques, et c'est ce que nous supposons pour l'instant, ils sont blancs ou grisâtres.

II. — *Laitiers à silice, alumine, chaux, et autres bases multiples.*

Outre les trois corps constituants *silice, alumine et chaux*, les laitiers

peuvent contenir d'autres bases métalliques *(Oxydes de fer et de manganèse)*; de la *magnésie* et de la *baryte*.

Il est rare que le laitier soit sans traces d'oxyde de fer, car il ne peut se faire que le pouvoir réducteur de C ou de CO s'exerce intégralement. La présence de l'oxyde de fer dans le laitier ne suffit pas pour causer un changement dans la qualité du métal, s'il y entre en trop petite quantité. Dans ces conditions la couleur du laitier, s'il est basique, d'une cassure grise légèrement bleuâtre pour les fontes noires (1), devient jaune sale, brune avec les fontes blanches, noire enfin avec les fontes d'allure froide surchargées en oxyde de fer. Si le laitier est acide, la coloration va du vert au noir; l'allure devenant de plus en plus froide.

La proportion d'oxyde de fer peut aller jusqu'à 2 0/0.

S'il y a exagération d'oxyde de fer, ce qui prouve que la réduction ne peut se faire à la suite de dérangements extraordinaires dans l'allure, il peut y avoir engorgement du haut-fourneau, soit formation d'un *loup*.

L'oxyde de manganèse peut se trouver dans les laitiers en plus fortes proportions que l'oxyde de fer; en allure de spiegel (2) ou de ferro-manganèse les laitiers sont colorés en vert soit par l'oxyde de manganèse qui y domine, soit par un peu de sulfure de manganèse.

En marche ordinaire, le manganèse donne aux laitiers acides des teintes d'améthyste, aux laitiers basiques des colorations vertes ou jaunes.

D'une manière générale, les *oxydes métalliques* de fer ou de manganèse qui sont des bases fondantes, augmentent la fluidité des silicates constituant les laitiers et teintent leur couleur.

Les laitiers présentent souvent une coloration bleue qu'on attribue au titane ou au vanadium.

Dans certaines fabrications on peut être amené à ajouter au lit de fusion de la *magnésie* et de la *baryte* (*soit du sulfate de baryte*), ou l'une

(1) Les fontes *grises* obtenues à haute température ont la plus grande partie de leur carbone précipité à l'état de graphite, les fontes *noires* ont la quantité de graphite maxima.

Les fontes *blanches* obtenues à plus basse température ont la plus grande partie de leur carbone à l'état dit combiné ou dissous.

Les fontes *froides* sont des fontes blanches obtenues avec une allure encore moins chaude, elles marquent la limite des fontes blanches et des aciers sauvages.

(2) Un *spiegel* est une fonte manganésée ayant 4 à 20 ou 25 0/0 de manganèse, un *ferro-manganèse* en contient de 20 ou 25 0/0 à 80 ou 85 0/0.

ou l'autre de ces deux bases, quelquefois même du *spath fluor*, des alcalis, etc...

a) *Magnésie.* — Presque tous les calcaires apportent de la magnésie, on trouve donc presque toujours cette base dans les laitiers. Parfois on en ajoute spécialement soit pure, soit sous forme de *dolomie* (carbonate double de chaux et de magnésie).

La chaux et la magnésie se substituent l'une à l'autre ; avec des laitiers basiques l'emploi de la magnésie pourra être très utile, car par l'adjonction d'une base nouvelle, la fusibilité sera augmentée et le laitier rendu plus basique qu'avec la chaux seule.

Il ne faudra pas toutefois que la proportion de magnésie soit exagérée, car cette base forme des silicates simples très réfractaires.

Le rapport entre la chaux et la magnésie ne sera pas inférieur à 3 ou à 4.

b) *Baryte.* — En introduisant la baryte, on aura des laitiers encore plus fusibles, car on introduit une nouvelle base qui est, en outre, plus fondante que la chaux. Elle est d'un prix élevé, et c'est ce qui limite son emploi.

En remplaçant une partie de la chaux par de la baryte, on peut diminuer la proportion des deux bases réunies et augmenter celle de l'alumine sans arriver à des laitiers infusibles, comme on y serait arrivé avec la chaux seule. C'est un moyen d'avoir des laitiers peu basiques et riches en alumine.

Quand on emploie le sulfate de baryte, on n'introduit pas pour cela forcément du soufre dans la fonte ; car ce sulfate étant décomposé à haute température, une partie du soufre s'élimine à l'état d'acide sulfureux, le reste passant en totalité ou en très forte proportion à l'état de sulfure de baryum sous l'action réductrice du carbone.

Ce sulfure de baryum passe au laitier.

c) *Spath fluor.* — On ajoute quelquefois du spath fluor au lit de fusion, et spécialement dans certains cubilots ; ce corps produit une action efficace sur la fusibilité des laitiers, 2 0/0 suffisent pour agir sur la fluidité des silicates et les délayer. Toutefois, dès que la température du vent atteint 600 à 700°, le fluor s'élimine à l'état de fluorure de silicium rendant incombustibles les gaz du gueulard sans s'incorporer au laitier.

d) *Alcalis.* — Leur présence agit sur les laitiers, quelques centièmes augmentent leur fusibilité, mais leur prix est trop élevé et les roches

alcalines sont trop siliceuses pour que leur introduction dans le lit de fusion soit avantageuse.

e) Remarque sur les sulfures des laitiers. — Les laitiers ne sont pas exclusivement composés de silicates; on y rencontre aussi des sulfures provenant de l'élimination du soufre ; le soufre ne s'éliminant pas, selon toute apparence, à l'état de sulfate.

Ces sulfures donnent des colorations spéciales d'un brun-jaunâtre, notamment dans les laitiers acides.

Ils consistent en sulfures de manganèse, de calcium, de baryum, d'aluminium, etc...

Voyons dans quelles conditions ces corps peuvent se former en procédant à l'étude de la *désulfuration* au haut-fourneau.

III. — *Désulfuration et déphosphoration ou passage du soufre et du phosphore aux laitiers.*

Nous nous proposons de rechercher dans quelles conditions on peut se débarrasser du soufre et du phosphore existant dans les charges du haut-fourneau.

Le soufre passe dans la fonte, probablement à l'état de sulfure de fer qui se trouve disséminé irrégulièrement dans le métal : il diminue la résistance de la fonte et est surtout nuisible dans les fontes destinées à être traitées pour fournir des fers ou des aciers.

Le phosphore passe dans la fonte à l'état de phosphure de fer ; nous avons déjà dit aux notions préliminaires combien ce métalloïde était nuisible dans les fers et les aciers.

Tandis que l'expulsion du soufre contenu dans les fontes est à peu près impossible dans les procédés d'élaboration des fers et des aciers, celle du phosphore est possible.

Nous étudierons plus tard comment a été résolu le problème de la déphosphoration des fontes.

Il n'est pas moins vrai que toutes les fois qu'on pourra ne pas introduire de phosphore dans une fonte on sera d'autant plus sûr d'arriver à un produit de meilleure qualité.

Voyons dans quelles conditions peuvent s'éliminer ces deux métalloïdes :

A. — ***Désulfuration.*** — Le soufre se trouve dans le minerai et dans le

combustible à l'état de sulfures, quelquefois dans le minerai à l'état de sulfates alcalino-terreux. Faisons abstraction des sulfates pour le moment et supposons que le soufre ne soit qu'à l'état de sulfures.

Le soufre n'est jamais complètement expulsé au haut-fourneau ; mais suivant la nature des fondants et la température développée, il peut en passer une grande partie aux laitiers.

1° Comment le soufre s'élimine-t-il ? L'expérience a montré que les laitiers riches en chaux ou les laitiers manganésifères étaient les plus propres à retenir le soufre. On en conclut que S y est probablement à l'état de CaS et de MnS.

Les réactions seront donc :

$$(1)\quad FeS + CaO + C = CaS + CO + Fe$$
$$(2)\quad FeS + MnO + C = MnS + CO + Fe$$

l'oxygène réduit se portant forcément sur le carbone à haute température.

Si l'atmosphère n'était pas réductrice· la formation des sulfures de calcium et de manganèse serait très vite arrêtée en présence de l'oxygène libre, celui-ci se portant sur les sulfures pour les oxyder. Si même la réaction s'opérait dans une région du fourneau riche en acide carbonique, une transformation identique aurait lieu.

Mais il sera tout aussi nécessaire pour que ces réactions puissent se produire que le laitier soit *basique*, c'est-à-dire chargé en chaux.

Si le laitier était acide, c'est-à-dire s'il y avait de la silice, CaO et MnO s'uniraient avec elle pour former des silicates qui sont très difficiles à réduire.

Enfin cette réaction ne paraît se produire qu'à très haute température, le laitier étant assez fluide pour qu'il y ait contact entre lui et la fonte. On prétend même que là se bornerait, en grande partie, le rôle de l'oxyde de manganèse qui donnerait au laitier surchargé de chaux et par suite très réfractaire, la fluidité qui lui fait défaut.

En résumé, l'expulsion du soufre demandera : CaO et MnO dans le lit de fusion — laitiers calcaires et haute température pour les fondre.

Il faudra donc marcher en forçant le combustible, c'est-à-dire en allure chaude.

Tandis qu'en allure chaude on peut obtenir une fonte ayant à peine quelques millièmes de soufre, le laitier en contenant 2 ou 3 0/0, on

ne peut en allure froide, c'est-à-dire en marchant au minimum de combustible, enlever plus de la moitié du soufre de la fonte.

2° Etats du soufre dans le lit de fusion. — Le soufre peut se trouver dans le lit de fusion à trois états différents : *a*) Dans la pyrite mélangée au minerai ; *b*) dans les sulfures du minerai ; *c*) dans des sulfates de chaux et de baryte contenus dans la gangue.

a) *Soufre de la pyrite du minerai.* — C'est le soufre de la pyrite du minerai qui est le plus difficile à éliminer. Les sulfures sont en effet peu réductibles, ils arrivent presque intacts dans la zone de réduction. Le minerai se réduit et la fonte se forme avant que le laitier soit fondu.

Le sulfure de fer se dissout dans la fonte et noyé dans la masse métallique arrive dans l'ouvrage sans avoir eu de contact intime avec la chaux. Il ne faut plus alors compter que sur la réaction superficielle se produisant entre la couche de laitier qui surnage au-dessus du bain de fonte dans le creuset et cette fonte elle-même.

Mais en tous cas cette réaction est incomplète, à moins qu'on n'ait pu mélanger le minerai assez intimement avec la chaux.

C'est ce qui se fait d'ordinaire pour le minerai artificiel constitué par le résidu du grillage des pyrites de fer employées pour la fabrication de l'acide sulfurique. On a soin de le façonner en briquettes agglomérées avec de la chaux avant de l'incorporer au lit de fusion. Il en résulte, en outre, l'avantage de ne pas introduire, dans ce cas particulier, du minerai pulvérulent dans le haut-fourneau.

b) *Soufre du combustible.* — Les combustibles ne brûlant que dans l'ouvrage, le sulfure de fer ou le soufre qu'ils contiennent se trouvent protégés contre le contact de la fonte ; ils restent empâtés dans les cendres. Celles-ci viennent se dissoudre dans le laitier et la réaction peut alors s'accomplir dans de meilleures conditions que ci-dessus.

c) *Soufre des sulfates.* — Les sulfates alcalino-terreux ne se décomposent qu'à très haute température et à ce moment, leur réduction par le carbone donne des sulfures de calcium et de baryum tout formés qui se dissolvent dans le laitier sans réagir sur la fonte, pourvu toutefois que les laitiers soient assez basiques pour les retenir.

Comme BaO, le sulfate de baryte permet d'avoir des laitiers basiques et à la fois très fusibles, ainsi qu'il a été dit plus haut.

B. — *Déphosphoration.* — Le phosphore se rencontre surtout dans les minerais à l'état de phosphate.

Si le laitier est acide, c'est-à-dire siliceux, les phosphates sont décomposés, la silice chassant l'acide phosphorique de ses combinaisons pour former avec les bases des composés plus fixes. Dans ce cas, l'acide phosphorique étant libre sera réduit par C ou par CO et Ph passera dans la fonte.

Si le laitier est basique, les phosphates resteront formés tant qu'ils n'arriveront pas dans la zone réductrice à haute température. Arrivés dans cette zone, C et CO les réduiront; la réduction est d'autant plus faible que l'acide phosphorique est moins énergiquement retenu par les bases.

Pour que l'élimination du phosphore soit possible, il faut que non seulement les laitiers soient basiques, mais que l'atmosphère soit oxydante. Or, ces conditions ne sont pas réalisables au haut-fourneau; on a vu que, sauf dans les cubilots, l'atmosphère y était toujours réductrice.

C'est lorsque le haut-fourneau marchera en allure froide, c'est-à-dire avec le minimum de combustible, qu'on pourra se rapprocher un peu de ces conditions nécessaires pour déphosphorer.

Quand on marche en allure froide, soit avec le minimum de combustible ou, si l'on veut, avec la proportion maxima de minerai à réduire et de fondants à faire réagir, la réduction est forcément incomplète. Il restera de l'oxyde de fer dans le laitier.

Or, cet oxyde de fer est une base énergique qui pourra retenir une partie de l'acide phosphorique. L'oxyde de fer est en effet le seul corps plus réductible que l'acide phosphorique et capable de le protéger contre la réduction.

De tels laitiers occasionnent un très fort déchet en fer et donnent une allure difficile à conserver à cause de l'engorgement possible du fourneau qui est à craindre, la température étant simplement suffisante pour faire fondre et réagir les matières en présence.

Quant aux phosphates qui peuvent se trouver dans les cendres des combustibles, ils seront aussi nuisibles que ceux des minerais.

Il importe d'ajouter qu'ils y sont en très faible quantité.

En résumé, la déphosphoration ne peut se réaliser pratiquement au haut-fourneau; le traitement des minerais phosphoreux donnera des fontes phosphoreuses : même dans le cas le plus favorable et en supposant qu'on puisse marcher d'une façon continue en allure extra-froide, on n'éliminerait que les 2/3 du phosphore. Or, une pareille

marche est éminemment dangereuse à cause des engorgements possibles et est très onéreuse à cause du déchet de fer.

Nous verrons ultérieurement comment, en des opérations séparées, on peut réaliser dans un cubilot spécial inventé par *M. Rollet* la déphosphoration et la désulfuration des fontes.

Cet appareil sera plus utilement étudié lorsque nous traiterons des appareils d'élaboration des aciers.

Chapitre 2e. — Classification des fontes

Anciennement, les fontes obtenues au haut-fourneau étaient classées en un certain nombre de numéros, suivant l'aspect de leur cassure ; cette classification ne pouvait et ne peut encore aujourd'hui être adoptée que pour des fontes obtenues avec les mêmes minerais, dans des conditions analogues, et s'applique en tout cas seulement aux fontes composées en grande partie de carbone ou de fer, avec proportions relativement faibles d'éléments étrangers, c'est-à-dire aux fontes dites *fontes ordinaires*.

Dès que les éléments étrangers, manganèse, chrome, silicium, etc... interviennent en proportions assez notables, l'aspect de la cassure ne permet plus de tirer aucune conclusion certaine : l'ancienne classification n'est alors susceptible d'aucun emploi, il faut avoir absolument recours à l'analyse chimique. Nous verrons à l'étude de ces fontes dites *spéciales* combien est variable l'aspect de leur cassure, soit pour une de ces fontes déterminées d'après la proportion du corps étranger dominant, soit d'une fonte à une autre.

Nous étudierons d'abord les fontes ordinaires.

Article 1. — Les fontes ordinaires

I. — *Les fontes d'après l'aspect de leur cassure.*

A. — *Définitions.* — Les réserves ci-dessus étant faites, on peut diviser les fontes, et quelle que soit leur composition chimique, en trois types principaux au point de vue de leur couleur et de la grosseur de leur grain: *les fontes grises*, *les fontes blanches*, et *les fontes intermédiaires*.

Ces divers produits ont des teneurs en carbone qui varient dans d'étroites limites : 2,5 0/0 est un minimum. Dans les fontes spéciales, le

maximum peut atteindre 12 0 0 (*certains ferro-chromes notamment*) et même plus.

Ce qui différencie ces fontes, ce n'est pas tant la teneur en carbone total que l'état dans lequel se trouve ce carbone, comme on va le voir.

1° *Fontes grises.* — Les fontes grises sont caractérisées par la présence en quantité plus ou moins grande du carbone à l'état de graphite.

Ce graphite est intercalé sous forme de paillettes dans les interstices de cristaux ferreux plus ou moins gros constituant le grain de la masse métallique.

On appelle fontes noires, les fontes très riches en graphite.

La grosseur du grain des fontes grises dépend de la plus ou moins grande proportion de graphite qu'elles contiennent; elle dépend aussi des conditions dans lesquelles ce corps s'est séparé du métal par précipitation.

Les fontes grises sont d'ordinaire les plus chargées en carbone et en silicium; mais cette règle n'est pas générale : il existe des fontes grises qui ne renferment pas plus de 3 et même 2,5 0/0 de carbone total.

Cependant tout le carbone de ces fontes ne s'y trouve pas à l'état de graphite; une certaine quantité beaucoup plus faible, il est vrai, s'y trouve à l'état de carbone vraisemblablement dissous dans le fer. Ce carbone a été appelé par M. Osmond (1) *carbone de trempe;* on l'appelle quelquefois et fort improprement *carbone combiné*, par opposition au graphite qui est précipité à l'état libre dans la fonte.

Enfin, il faut dire qu'une certaine partie du carbone se combine au fer, donnant un carbure se rapprochant assez de la formule Fe^3C.

Voici à titre d'exemple, et *pour mémoire*, la composition d'une fonte grise; il est clair que les proportions ci-dessous indiquées varieront pour les différentes fontes grises dans les limites fixées précédemment:

Fonte grise	Carbone dit combiné	0,79	0/0
	Graphite	2,6	—
	Silicium	2,3	—
	Manganèse	0,04	—
	Soufre	0,01	—
	Phosphore	0,07	—
	Le reste en fer		

(1) **M. Osmond**, ingénieur des arts et manufactures, est l'auteur d'un très grand nombre de travaux scientifiques ayant trait à la métallurgie : ces travaux si féconds en résultats de tout ordre, seront analysés dans l'étude du « **Travail des métaux** ».

2° *Fontes blanches.* — Les fontes blanches sont en général moins carburées, presque tout le carbone y est à l'état dit combiné ou de carbone de trempe. Leur texture est compacte et cristallisée, mais varie totalement avec la teneur en carbone. Quand celle-ci est faible, la texture est massive, sans fibres ni grains bien apparents ; quand elle est plus forte et approche de 4 à 5 0/0, la texture devient fibreuse ou rayonnée.

Les fontes noires contenant la proportion maxima de graphite sont à l'une des extrémités de la série des fontes. Il faut citer à l'autre extrémité les fontes blanches dites froides où la teneur en carbone combiné atteint son minimum soit 2,5 0/0. Au dessous de 2,5 0/0 et jusqu'à 1,5 0/0, les métaux obtenus ne sont plus des fontes mais des aciers dits sauvages qu'on a déjà cités.

Quand il y a du manganèse, la cassure est parfois caverneuse et présente un grain cristallin : ce métal semble empêcher la précipitation du graphite et, s'il est en fortes proportions, la fonte reste blanche même après qu'on a réalisé les conditions nécessaires d'ordinaire pour cette précipitation.

En résumé, il appartient à M. Osmond d'avoir établi que dans les fontes blanches, le carbone improprement appelé combiné est, au contraire, pour la majeure partie, simplement dissous dans le fer dans l'état qu'il a désigné sous le nom de carbone de trempe.

Une partie est cependant combinée, mais cette combinaison ne s'effectue que durant le refroidissement, une fois la solidification effectuée, vers 695°.

Voici, à titre d'exemple, et *pour mémoire*, la composition d'une fonte blanche ; ainsi qu'on l'a dit pour les fontes grises, les proportions indiquées varieront pour les différentes fontes blanches dans les limites spécifiées :

Fonte blanche.	Carbone dit combiné . . .	3,41 %
	Graphite	0,05
	Silicium.	0,62
	Manganèse	0,26
	Le reste en fer.	

3° *Fontes intermédiaires.* — Les fontes intermédiaires sont comprises entre les fontes grises et les fontes blanches.

On les appelle *truitées*, quand elles présentent des taches grises sur un fond blanc ou des taches blanches sur un fond gris.

On les appelle *rubannées*, lorsque le gris et le blanc sont nettement séparés en zones bien tranchées.

Ces fontes sont le résultat évident d'une allure qui a varié dans la marche du haut-fourneau ; car, grise ou blanche, la fonte correspond en principe à une allure nettement définie, comme on le verra.

Cependant, il importe de signaler que le *refroidissement* exerce une influence sur les différents aspects des fontes à la cassure, et c'est pourquoi, dans un classement de diverses fontes, on devra toujours observer si elles ont été coulées dans des rigoles en sable conduisant mal la chaleur ou dans des moules métalliques provoquant, au contraire, un refroidissement beaucoup plus rapide.

Nous reviendrons plus loin sur ce point important.

B. — *Causes déterminant la précipitation du graphite.* — Plusieurs causes concourent à provoquer le dépôt de graphite et la formation de la fonte à gros grain.

M. l'ingénieur des mines Ferd. Gautier, dans son mémoire si documenté sur les alliages ferro-métalliques (Exposition universelle de 1889) traite cette question métallurgique du plus haut intérêt d'une façon complète. Nous en donnerons ici une analyse succincte.

1° *Influence du silicium.* — Il était accepté depuis longtemps par les métallurgistes « *qu'on pouvait faire varier la teneur en graphite des* « *fontes en leur ajoutant ou en leur enlevant du silicium.* »

Des expériences complètes et concluantes donnant confirmation entière de ce fait n'avaient point encore été tentées lorsqu'en 1885, M. Thomas Turner, professeur en Angleterre, commençait, devant la Société chimique de Londres, une série de communications relatives à l'influence du silicium sur les propriétés de la fonte.

Nous ne parlerons pas ici des modifications qu'apporte à leurs propriétés la présence du silicium dans les fontes, nous contentant d'examiner le rôle que joue ce corps dans leur constitution intime.

M. Turner arriva à conclure qu'il était nécessaire, pour qu'une fonte fût grise, qu'elle contînt un certain minimum de silicium.

Si cette conclusion était juste, on devait revenir à la fonte blanche en enlevant à la fonte la majeure partie de ce silicium.

Or, dans les diverses méthodes d'élaboration des aciers ou des fers,

le silicium disparaissant le premier dans l'affinage, on peut arrêter l'opération assez tôt pour que la fonte grise traitée ait simplement perdu une certaine partie de son silicium, sans que les teneurs en autres éléments étrangers aient été sensiblement altérées, ou même enlever pour la couler séparément une certaine quantité du métal ainsi partiellement affiné.

On constate toujours à la cassure du métal refroidi que la fonte grise traitée est devenue blanche un peu après le commencement de l'affinage.

L'ancienne opération du *mazéage* sur laquelle nous reviendrons avait pour but de faciliter le traitement ultérieur des fontes grises dans les appareils affineurs. En réalité, le résultat que l'on obtenait était l'enlèvement de la majeure partie du silicium en rendant la fonte blanche.

On pouvait alors réaliser l'affinage rapide des fontes blanches, tout en maintenant à la fonte toute sa fusibilité et en lui conservant presque tout son carbone.

Nous verrons, en effet, combien la présence du silicium en assez forte proportion est un obstacle à la rapidité des opérations.

Restait à traiter le problème inverse, à savoir : transformer une fonte blanche en fonte grise par addition de silicium.

L'addition de silicium fut réalisée en refondant ensemble dans un cubilot la fonte blanche à transformer avec une certaine quantité de fonte *spéciale* riche en silicium (*ferro-silicium*).

La fonte devint grise.

L'expérience démontra *qu'il n'existe pas de fonte grise ayant une teneur en silicium inférieure à 1 0/0 et qu'on était assuré de transformer une fonte blanche en fonte grise en complétant ce qui lui manquait de silicium pour arriver à une teneur de 2 0/0 environ.*

On voit de suite quel parti les fonderies de fonte purent tirer de ce fait. La fonte blanche ne convient pas, en effet, pour certains usages (*fabrication de pièces en fonte par voie de moulage notamment*) ; on pouvait donc la transformer à son gré en telle ou telle nuance désirée de fonte grise, par simple fusion, avec une addition de fonte riche en silicium et fabriquée, en conséquence, par des procédés spéciaux.

On peut présenter l'explication de ces faits de deux façons différentes :

a) Le silicium laisse le carbone dans une solution de fer insuffisante pour le dissoudre. — La fonte grise à l'état liquide se compose d'une

dissolution dans le fer fondu de corps solides, liquides et gazeux; durant le refroidissement et la solidification de la fonte, ces divers éléments se précipitent suivant leur ordre de fusibilité : d'abord le fer pur ou légèrement carburé, puis vers 1150° un siliciure de fer qui probablement correspond à la formule Fe^2Si, puis plus tard encore *(dans les fontes phosphoreuses)*, vers 900°, un phospho-carbure de fer.

Après la solidification du siliciure de fer, il reste dans l'intérieur de la masse de fonte une solution de carbone dans le fer qui se solidifie à son tour.

Si elle est sursaturée, le carbone en excès se précipite sous forme de graphite durant ce refroidissement et entraîne une partie du carbone qui aurait pu rester dissoute.

Le silicium aurait donc pour effet de concentrer le carbone dans une quantité de fer insuffisante pour le maintenir dissous à l'état solide.

Le manganèse, au contraire, augmente la solubilité du carbone et combat l'action du silicium.

b) La précipitation du carbone par le silicium est le résultat de l'inégale solubilité de ces corps dans le fer. — La solubilité du carbone dans le fer est *limitée*.

On la représente d'ordinaire par Fe^mC sans qu'on soit bien certain de la valeur numérique à donner à m. Il reste entendu qu'on ne saurait attribuer à ce symbole le caractère d'une combinaison.

Or, cette solubilité du carbone est influencée par la présence d'autres corps en plus ou moins grande proportion dans le fer.

C'est ce qui a lieu, par exemple, pour le manganèse et le chrome. Une fonte chromée *(ferro-chrome)* peut avoir jusqu'à 12 0/0 de carbone combiné ou dissous; une fonte manganésée (*ferro-manganèse*) n'en a guère plus de 6 à 7 0/0.

Si pour transformer une fonte grise on la refond avec du ferro-silicium à p 0/0 de manganèse on obtiendra une précipitation du carbone beaucoup plus nette que si on la refond avec un ferro-silicium à même teneur en silicium mais ayant np 0/0 de manganèse.

Au contraire, la solubilité du silicium dans le fer est *illimitée*, Caron a montré qu'on peut dissoudre le silicium dans le fer en toutes proportions.

D'autre part, au point de vue thermochimique, MM. Troost et Hautefeuille ont prouvé que la dissolution du carbone dans le fer absorbe

: la chaleur, tandis que la dissolution du silicium dans le fer se fait ·
'ec un léger dégagement de chaleur.

Le déplacement du carbone par le silicium est dû à une précipitation ıimique : le plus soluble des deux corps précipitant celui qui l'est le ;oins ; celui qui produit un dégagement de chaleur se substituant à ·lui qui en absorbe.

2° *Moyens d'introduire du silicium en quantité suffisante pour que la ınte soit grise.* — Si l'allure du haut-fourneau est chaude, c'est-à-dire on marche avec excès de combustible et si le lit de fusion est réfractıire, la fonte sera grise.

Le laitier peut être rendu réfractaire de trois façons : par excès de lice, de chaux ou d'alumine.

a) *Les laitiers siliceux* ont une tendance à faciliter la réduction du licium, parce que la silice n'est pas retenue par les bases ; mais il faura pour cela une action réductrice énergique, sinon la silice tend à se ɔmbiner à l'oxyde de fer. La réduction devra être réalisée avant que ı fusion commence et avant que le silicate de fer puisse se forıer. Une fois l'oxyde combiné à la silice on ne pourrait la réduire u'avec une température très élevée et une énorme dépense de charbon.

b) *Si on emploie des laitiers calcaires* (et c'est le cas presque général es hauts-fourneaux marchant au coke, car ces laitiers sont épurateurs ar rapport au soufre), la marche en fonte grise sera plus difficile.

Or, de pareils laitiers sont très réfractaires : si la nature du minerai st telle et si la température du haut-fourneau est suffisante pour que ı réduction ait pu s'opérer en grande partie avant que la fusion soit omplète c'est-à-dire avant que la silice ait pu s'unir à la chaux, on ıeut espérer introduire assez de silicium dans la fonte pour qu'elle levienne grise.

Une pareille marche offrira plus de difficultés que la précédente.

c) *Si on emploie des laitiers alumineux* la fabrication des fontes grises sera plus facile, car l'alumine base faible ne retient pas énergiquement la silice et s'oppose moins que la chaux à la réduction du silicium.

La difficulté de la marche proviendra alors de ce que ces laitiers sont très difficiles à fondre ; on augmentera leur fluidité en ajoutant dans le lit de fusion, et en petites quantités, des bases telles que la magnésie, l'oxyde de manganèse et surtout la baryte.

En résumé, pour fabriquer de la fonte graphiteuse, il faudra que la fusion dans l'ouvrage soit précédée d'une réduction presque complète

et que par conséquent la gangue ne soit pas trop fusible, en forçant le combustible.

Il y aura par suite excès de silicium, la silice ayant pu être réduite avant la formation complète des laitiers; mais, il y aura aussi, en général, excès de carbone absorbé, provenant de la surélévation de température, de l'excès du combustible par rapport au minerai ou de sa nature.

Cet excès de carbone absorbé, corrélatif de l'excès de silicium, contribuera aussi pour sa part, lors du refroidissement de la fonte, à la précipitation du graphite.

3°) *Influence du refroidissement.* — On a dit que la fonte grise à l'état liquide n'était qu'une dissolution dans le fer fondu de certains corps en proportions très variables. Dans le refroidissement et la solidification de la fonte, ces corps se précipitent suivant leur ordre de fusibilité. Ne considérons parmi ces éléments que le carbone.

Toutes les transformations qui s'opérent pendant le refroidissement exigent un certain temps pour s'accomplir; un refroidissement brusque maintient la situation originelle relativement intacte, *c'est le principe de la trempe.*

Considérons une fonte qui, par refroidissement lent après sa coulée *(dans des rigoles en sable par exemple)*, eût pris le grain de la fonte grise; si on la coule dans un moule à parois métalliques, c'est-à-dire provoquant un refroidissement rapide au moins près de la périphérie, elle blanchira sur une certaine épaisseur. On dit qu'elle s'est trempée.

En réalité, le carbone dissous uniformément dans la fonte alors qu'elle était à l'état fluide n'a pas trouvé le temps nécessaire pour se précipiter à l'état de graphite, la solidification s'étant opérée avec plus de rapidité jusqu'à une certaine distance de la surface.

L'épaisseur et le volume du moule métallique (*en fonte généralement*) appelé *coquille* influent sur le degré de trempe par la raison qu'ils influent sur la vitesse du refroidissement de la fonte qu'on y coule.

Nous ne saurions parler ici des procédés de coulée en coquille, ils ressortissent à la seconde partie de ce *Traité* soit au « Travail des métaux ».

C. — *Des allures du haut-fourneau.* — Le haut-fourneau est un appareil permettant d'obtenir les produits les plus divers selon le choix judicieux des matières premières, la constitution du lit de fusion et un chauffage convenable du vent.

Régler l'allure d'un haut-fourneau, c'est déterminer l'ensemble des nditions nécessaires pour que cet appareil produise telle ou telle quaé de fonte donnée.

Les principales conditions à déterminer pour régler l'allure sont :

La composition de la charge ;

La proportion du combustible ;

L'état du vent soufflé aux tuyères : sa température, sa pression, le ıids du vent lancé par minute, etc...

A chaque fabrication et avec un profil intérieur déterminé de hauturneau correspond une allure dont on ne peut guère s'écarter.

La nature de la fonte est le critérium principal de l'allure et l'objectif ême qu'on se propose d'atteindre.

a) **Dans l'allure normale,** les laitiers se produisent régulièrement et ulent facilement sans être trop fluides ; après refroidissement, ils sont esque homogènes et contiennent peu d'oxyde de fer.

Le bruit du vent aux tuyères est régulier ; le mouvement de desnte des charges est uniforme.

La température des gaz du gueulard n'est pas très élevée ; quand on ıvre l'appareil de fermeture on les voit s'échapper régulièrement par ıte la section du fourneau, sans vivacité, ni lenteur. Si on enflamme gaz *(en y plongeant une barre de fer portée au rouge cerise)* ils brût avec une flamme violacée et une fumée blanche.

'uand la couleur de la flamme est bleuâtre, c'est que le feu est aux ·ges : la température est trop haute, il y a trop d'oxyde de carbone luit.

ıand la flamme est languissante ; cela provient du tassement des ıres solides qui empêchent l'arrivée du vent.

tun haut-fourneau produisant une fonte déterminée, voyons comon pourra modifier l'allure de cet appareil.

llure chaude. — Si on diminue le poids de la charge de minerai, odifier en rien les autres conditions du fonctionnement, la quancombustible brûlé sera la même, mais l'allure deviendra plus ; de même, si on marche avec excès de combustible.

nte deviendra donc plus carburée et plus siliceuse, les laitiers ıoins fluides car le calcaire du fondant y dominera *(c'est en ıstine qui est généralement employée avec le coke).*

lure extra-chaude expose à des engorgements, car les laitiers ıt trop réfractaires. Dans ce cas, en effet, la zone de fusion

s'élève et le feu prend aux charges ; la réduction s'opère alors à haute température et les gaz du gueulard sont chargés en CO ; la température baisse au-dessous des tuyères et le creuset se refroidit puisque la fonte et le laitier diminuent.

c) **Allure froide.** — Si on augmente le poids de la charge de minerai ou si pour un même poids de la charge normale on augmente la richesse du minerai, l'allure du haut-fourneau deviendra moins chaude, les fontes seront moins carburées et les laitiers, contenant un peu plus d'oxyde de fer, prendront une teinte plus foncée et perdront de leur fluidité. La réduction deviendra de moins en moins complète, à mesure que l'allure deviendra de moins en moins chaude ; on arrivera à la production des fontes truitées, puis à celle des fontes blanches.

Pour marcher à une température plus basse il faut naturellement des laitiers plus fusibles.

Le maximum de fusibilité s'obtiendra avec des laitiers moins calcaires et plus acides que ceux de fonte grise. Ces laitiers retiendront moins le soufre et la fonte sera moins pure ; elle sera, il est vrai, un peu moins phosphoreuse.

Le seul caractère qui soit constant aux laitiers de fonte blanche est la présence de l'oxyde de fer qui suffit pour rendre les laitiers notablement plus fusibles sans que rien soit changé aux proportions respectives des autres éléments. On peut donc, *avec le même lit de fusion*, passer d'une allure à une autre en modifiant la proportion du combustible.

Mais la marche en fonte blanche sera toujours plus facile avec une charge fusible ; si elle est réfractaire, l'allure froide ne pourra se réaliser qu'en laissant passer dans le laitier beaucoup d'oxyde de fer pour le rendre fluide à température modérée. De pareils laitiers seront très corrosifs et la marche sera précaire.

En augmentant la température du vent, on produit les mêmes modifications dans l'allure qu'en diminuant la charge.

Si on augmente le poids du vent lancé par minute dans le haut-fourneau, la descente des charges s'accélère et on peut tomber en allure crue.

d) **Allure crue.** — L'allure crue est dangereuse ; elle résulte soit d'une trop grande vitesse du fourneau, soit d'une surcharge trop forte de minerai. Elle ne donne que des fontes blanches et caverneuses.

L'allure crue provenant d'une trop grande vitesse du fourneau est

très mauvaise, car elle peut amener l'engorgement au bas du fourneau en formant *un loup*.

L'allure crue par surcharge de minerai est quelquefois employée à dessein pour obtenir des fontes à très bas prix dans le cas où l'on traite des minerais très réductibles.

Si l'on augmente encore la charge de minerai ou la richesse du lit de fusion, la fonte devient de moins en moins carburée et l'on finit par avoir une fonte assez décarburée pour se rapprocher de l'acier ; c'est de l'acier sauvage, obtenu dans certains hauts-fourneaux de Styrie, métal d'une dureté extrême qui sert à fabriquer les filières.

Les laitiers d'allure crue se refroidissent très vite ; ils renferment de 10 à 15 0/0 d'oxyde de fer et sont bruns noirs, très lourds, scoriacés, etc...

Cette allure est à éviter en principe, car on est à la limite de l'engorgement.

e) **Allure rapide**. — Nous avons dit plus haut que si l'on augmentait le poids du vent lancé par minute, la descente des charges s'accélérait et pouvait même occasionner *l'allure crue*.

Et cependant, *à priori*, il y a intérêt à accélérer l'allure pour augmenter la production, à réaliser ce qu'on a appelé *l'allure rapide*.

Nous devons aux travaux si remarquables de M. l'Ingénieur de Billy sur la « Fabrication de la fonte » des données fort précieuses sur la réalisation de l'allure rapide. Nous ne citerons des nombres que lorsque nous traiterons de l'organisation du haut-fourneau et de ses accessoires ; pour le moment bornons-nous à des indications générales.

C'est en agissant sur le profil du haut-fourneau qu'on pourra obtenir l'allure rapide.

Si l'on veut brûler plus de coke on doit, pour ne pas changer la répartition des températures dans la hauteur du fourneau, *augmenter d'abord la section du creuset*. Or, cette augmentation de section conduit à donner au vent *une pression plus grande*.

« *L'élargissement du creuset, l'élévation de la pression du vent, telles* « *sont les conditions essentielles d'une forte production* (de Billy). » En outre, il y a lieu de régler en conséquence la *capacité du fourneau* et de donner *aux étalages une pente raide*, afin de faciliter la descente des charges.

Les remarquables résultats obtenus aux Etats-Unis par l'allure rapide furent publiés pour la première fois en Europe au Congrès de l'Iron and steel Institute de 1890 et y causèrent un vif étonnement. On ne

connaissait, en effet, que les graves inconvénients de l'allure crue; on objectait aussi que les revêtements des hauts-fourneaux s'usant plus rapidement, il faudrait dépenser en réparations une grande partie des économies réalisées sur les frais généraux, la main d'œuvre et la consommation de coke.

Il est certain que l'allure rapide n'est pas sans inconvénients :

La chaleur sensible des gaz du gueulard est relativement grande, quoique on puisse y obvier en donnant au fourneau une plus grande hauteur. — Le combustible est moins bien utilisé ; car, avec une allure rapide, la chaleur monte forcément et les charges arrivent plus vite dans les régions à température élevée où le carbone solide intervient.

La réduction pouvant devenir trop imparfaite, l'allure crue peut se réaliser.

En revanche, la rapidité de l'allure présente de grands avantages :

Les pertes par rayonnement et conductibilité sont très notablement réduites; d'où, grande économie de combustible.

Il y a un contact plus complet entre le minerai et les gaz réducteurs, ceux-ci filtrant plus régulièrement à travers la masse solide ; d'où, moins de gaz et par suite moins de combustible pour enlever au minerai une même proportion d'oxygène.

Enfin, tout compte fait, il semble démontré qu'on réalise une économie sensible de combustible en marchant rapidement : cette économie s'ajoute au bénéfice incontestable résultant d'une production intensive.

Ajoutons pour terminer cet aperçu un peu sommaire que l'exemple des Etats-Unis commence à être suivi en Europe. En France les essais de production rapide sont encore fort timides.

Nous croyons avec M. l'Ingénieur de Billy que « *ceux qui se sont « engagés dans la voie des grandes productions ont aujourd'hui lieu de « s'en féliciter, car le progrès est vraiment là, et à moins de se « condamner à une réelle infériorité de fabrication, tous se voient « contraints de suivre ce mouvement.* » — (De Billy, *Revue des progrès récents de la métallurgie du fer*).

II. — Les fontes au point de vue de leur emploi.

On distingue dans les fontes ordinaires au point de vue de leur emploi : les fontes de moulage et les fontes d'affinage.

1° *Fontes de moulage.* — Les fontes de moulage doivent avoir trois

ités principales : 1° la fluidité qui leur permet de bien remplir tous ecoins du moule et de reproduire toutes les formes ; 2° la ténacité qu'il s'agit de pièces de machine destinées à supporter des efforts ; ı douceur qui permet de les travailler aux divers outils ou machi-outils.

a fonte grise seule satisfait à ces conditions ; le graphite ne devra y être trop abondant, car il la rendrait trop douce.

es meilleures fontes pour les cas ordinaires sont les fontes grises à n serré ayant de 1,5 0/0 à 2 0/0 de silicium ; elles sont moins fluides ; plus résistantes que lorsque la teneur en silicium est trop e. Au delà de 3 0/0 de silicium la fonte est moins résistante ; nd on recherchera surtout la ténacité dans le moulage, il faudra nir aux fontes truitées.

e phosphore augmente beaucoup la fluidité ; mais il diminue la cité. Il n'en faudra pas plus de quelques millièmes dans les mous résistants.

sera un auxiliaire précieux dans les fontes d'ornements où l'on re-che la délicatesse du moulage.

'arsenic donnera des propriétés analogues.

uant à l'aluminium, son action sera étudiée concurremment avec du silicium à propos des fontes spéciales.

es fontes de moulage sont divisées en 5 ou 6 classes numérotées ant l'aspect du grain.

es fonderies de 1re fusion sont celles qui prennent la fonte directe-ıt au haut-fourneau pour la verser encore liquide dans les moules ; t le procédé le plus économique, mais il faut pour cela que le *four-u ait une allure bien régulière* et que *les fabrications en cours commodent toutes de la même qualité de fonte.*

Dans la plupart des cas on marche en 2e fusion, c'est-à-dire qu'on ond la fonte obtenue au haut-fourneau dans des appareils spéciaux : ilots, fours à reverbère ou creusets.

L'étude complète de ces appareils sera faite dans la seconde partie ce traité, soit au « Travail des métaux ». Nous nous bornerons ur le moment à quelques notions sommaires :

a) *Les cubilots* sont des fourneaux du genre « fours à cuve » cons-its en briques réfractaires. Les anciens cubilots étaient cylindriques : ur que la température soit plus régulière, il vaut mieux rétrécir l'ou-age. Une des formes les plus employées maintenant consiste à for-

mer l'ouvrage d'un cylindre étroit surmonté par une cuve cylindrique plus large ayant 1^m20 à 1^m30 de diamètre, quelquefois même 1^m50 et jusqu'à 2^m.

Pour pouvoir emmagasiner plus de fonte, on élargit le creuset au-dessous de la région des tuyères. La hauteur totale varie de 4 à 6 mètres.

Les tuyères sont disposées tout autour de l'ouvrage et lancent de l'air généralement froid. L'usage de l'air chaud employé plusieurs fois avec des températures de 200 à 400° n'est pas entré dans la pratique courante des fonderies. Souvent l'ouvrage est entouré d'une boîte à vent en tôle où arrive l'air de la machine soufflante avant de passer dans les tuyères. L'air se chauffe donc un peu, tout en rafraîchissant les parois.

Les cubilots offrant peu de résistance au passage des gaz sont soufflés par des ventilateurs. La pression en hauteur de mercure peut être de 2 à 3 centimètres.

Le combustible employé est le coke.

La fonte passée au cubilot doit être un peu plus noire que celle qu'on emploierait en 1re fusion, à cause de sa tendance à blanchir par suite de l'atmosphère oxydante de l'appareil.

Il faut ajouter un fondant nécessaire pour faire passer au laitier les cendres du combustible.

La proportion de castine doit être de cinq fois à peu près le poids des cendres du coke, soit 5 à 6 0/0 de celui de la fonte.

Parfois on ajoute du spath fluor pour rendre les laitiers plus fluides quand ils sont très calcaires.

b) Les fours à reverbère sont des fours dans lesquels le combustible brûlé sur une grille est indépendant de l'aire sur laquelle repose la matière à fondre ; leur description sera donnée ultérieurement à propos du puddlage. La fusion au reverbère est beaucoup plus coûteuse: la chaleur est moins bien utilisée. L'atmosphère toujours oxydante provoque un déchet plus fort par oxydation. En revanche, la fonte est soustraite au contact nuisible des cendres et du soufre du coke ; elle subit un commencement d'affinage qui lui donne plus de ténacité. Ce procédé ne s'emploie que pour les moulages qui doivent être résistants ; pour les canons, les cylindres de laminoirs, etc...

c) Les creusets sont des récipients faits en terre réfractaire mélangée de graphite et fermés par un couvercle. On les chauffe en les plaçant sur l'aire d'un four à laboratoire chauffé à la houille ou sur celle d'un

four chauffé par la combustion des gaz venant d'un gazogène, etc...

Cette fusion est la plus coûteuse, mais elle ne modifie nullement la qualité de la fonte qui est chauffée tout à fait à l'abri de l'air.

On ne l'emploie que pour les petites pièces où il faut une fonte bien fluide.

Quant aux fontes destinées à être trempées, elles doivent contenir assez de silicium pour que la partie non trempée reste grise ; mais elles doivent en renfermer le moins possible, car plus la teneur en silicium est élevée, plus il faut un refroidissement brusque pour empêcher la séparation du graphite : il se produit alors des tensions excessives pouvant occasionner des ruptures. Ces fontes ont en moyenne 3,5 0/0 de carbone et de 0,7 0/0 à 1 0/0 de silicium.

Il faudra du manganèse pour augmenter la dureté de la trempe, mais pas en forte proportion, sinon la surface se prend en aiguilles ou en lamelles n'adhérant pas au centre de la pièce : la trempe est alors exagérée. On admet de 8 à 10 millièmes de manganèse pour avoir une bonne trempe donnant un grain serré.

2° *Fontes d'affinage.* — Nous serons très bref sur les fontes d'affinage ; leur composition est, du reste, fort variée.

Il est préférable d'en reporter l'étude à l'exposé des procédés d'élaboration des fers et des aciers ; chaque procédé exigeant en principe des fontes qui lui sont propres et dont la composition est soumise à des règles déterminées, au moins pour certains éléments.

En général, elles devront être exemptes de soufre quel que soit le procédé employé.

Dans certains procédés, elles devront être aussi pures que possible, l'élimination du phosphore n'étant pas réalisable dans les appareils employés ; dans d'autres, au contraire, elles devront être riches en phosphore, ce métalloïde jouant un rôle spécial et utile dans l'affinage, tout en s'éliminant.

Souvent, le silicium sera nuisible comme retardant l'affinage ou empêchant l'élimination de certains corps ; sa présence sera, au contraire, indispensable pour donner, par sa combustion, une quantité de chaleur nécessaire au métal élaboré.

Article 2. — Les fontes spéciales

L'emploi des fontes spéciales s'impose au métallurgiste dans la fa-

brication des aciers, soit pour déterminer dans le bain en fusion une réaction utile, soit pour donner au métal des propriétés résultant de l'apport du corps qui y prédomine (*chrome, manganèse, silicium*, etc...)

Il serait d'un extrême intérêt d'exposer parallèlement l'histoire de l'emploi de ces fontes dans l'élaboration des aciers et celle de leur fabrication, soit au haut-fourneau principalement, soit dans les autres appareils métallurgiques (*four à manche, creuset*, etc...)

La nécessité d'une exposition didactique ne nous le permet pas, nous devrons nous occuper tout d'abord de leur fabrication, renvoyant pour leur rôle chimique à l'étude des procédés généraux de production des aciers.

Le mémoire déjà cité de M. Ferd. Gautier sur les alliages ferro-métalliques contient l'étude complète de presque toutes ces fontes au point de vue de leur constitution et de leur emploi en sidérurgie : nous lui avons emprunté un grand nombre des renseignements qui suivent.

I. — *Le ferro-manganèse* (*Fe-Mn*).

A. — *Définition des ferro-manganèse.* — Dès que la proportion de Mn atteint ou dépasse 4 à 5 0/0 ; la fonte, qui, pour des teneurs inférieures de ce métal, était simplement dite plus ou moins manganésée, prend le nom de *spiegeleisen* (ou même *spiegel*) jusqu'à une teneur en Mn allant de 20 à 25 0/0 environ et celui de *ferro-manganèse* à partir de 20 0/0 à 25 0/0 jusqu'à 80 ou 85 0/0 de ce métal.

Il est difficile d'obtenir au haut-fourneau du Fe-Mn à teneur en Mn supérieure à 85 0/0. Il n'y a, du reste, aucun intérêt à en obtenir, car l'échelle des fontes manganésées est assez étendue pour donner satisfaction à tous les besoins de la pratique. En outre, la conservation d'une pareille fonte est à peu près impossible à l'air humide, à cause de la grande oxydabilité du métal.

1° *Spiegeleisen.* — Les spiegeleisen sont à grandes facettes ou lamelles brillantes. Les facettes sont plus ou moins irisées selon que les gueusets cassés à chaud l'ont été dans un air sec ou humide ; cette irisation provient d'une oxydation superficielle dont la coloration est due au phénomène optique des lames minces. Les spiegels ne présentent ces larges facettes que lorsque la teneur en manganèse tombe au-dessous de 10 0/0, au delà ces facettes diminuent de plus en plus pour faire place à une texture plus ou moins aiguillée.

Ces fontes appelées aussi *miroitantes ou spéculaires* (spiegel : miroir) furent obtenues d'abord au pays de Siégen (Prusse) avec les minerais spathiques de la région.

2° *Ferro-manganèse.* — Au fur et à mesure que la teneur en Mn augmente, la largeur des facettes diminue et la texture devient plus ou moins grenue; la couleur du Fe-Mn est d'un blanc argentin et la tendance à l'irisation est loin d'être aussi grande que pour les spiegels. Les ferro-manganèses riches refroidis lentement présentent à la cassure des gueusets un creux de retrait tapissé d'aiguilles.

M. *Mallard* a étudié les formes cristallines du Fe-Mn à différentes teneurs. Il a constaté que le spiegel à 11 0/0 de Mn cristallisait dans le système d'un prisme de 112°33 ; cette forme se maintient jusqu'à la teneur de 52 à 55 0/0 de Mn. Au delà de ces limites, il y a un changement brusque, la structure de lamelleuse devient bacillaire et cylindroïde et le système passe au prisme rhombique voisin de 120°.

Il existe un point de démarcation entre le spiegel et le ferro-manganèse nettement accusé par un fait plus palpable que ne saurait l'être aucun indice fourni par la cristallisation. A *24 0/0 le spiegel réduit en poudre s'attache encore à l'aimant, tandis qu'à la teneur de 25 à 26 0/0 de Mn, l'aimant ne l'attire plus.*

B. — *Teneur en carbone ou en autres corps des Fe-Mn.* — La teneur de ces fontes en carbone est un facteur essentiel à considérer dans le rôle chimique qui leur revient.

Le C y est entièrement combiné, en admettant toutefois qu'il n'y ait pas dans la fonte une proportion de Si supérieure à 5 0/0; auquel cas, malgré l'énergie avec laquelle le Mn facilite la combinaison du C avec Fe, la proportion de C combiné s'abaisse notablement.

Ce qu'il importe de retenir, ce n'est pas tant l'état sous lequel on rencontre le C dans le Fe-Mn que la proportion centésimale de ce corps

On peut retenir que la teneur en C atteint 6 0/0 en moyenne; et quoiqu'elle oscille entre 4 et 7 0/0 au maximum selon la teneur en Mn et l'allure du haut-fourneau qui a produit les Fe-Mn, on peut la considérer comme sensiblement constante et l'admettre comme telle dans les considérations générales ayant trait au rôle chimique de ces fontes. La variation de 4 à 7 est en effet d'un ordre extrêmement petit par rapport à la variation de la teneur en Mn.

Quant aux autres corps, nous admettrons que leurs proportions ne dépassent pas celles qu'on rencontre dans les fontes ordinaires, sinon on aurait affaire à une autre fonte spéciale : Fe-Mn-Si (ferro-manganèse-silicium) si la proportion de silicium atteignait ou dépassait 8 0/0 pour aller jusqu'à 12 0/0 et même plus de silicium.

Avant d'aborder la fabrication de ces fontes, il importe de dire quelques mots des propriétés des principaux composés manganésés qu'on rencontre dans cette métallurgie particulière.

C. — *Des principaux composés manganésés.* — Nous n'examinerons, bien entendu, que Mn ou les composés que nous rencontrerons dans l'étude de la réduction de ses minerais au haut-fourneau, soit :

$$MnO^2,\ Mn^3O^4,\ MnO.$$

1° *Le manganèse.* — Le manganèse est un métal analogue au fer, mais il en diffère notablement par certaines propriétés.

Scheele découvrant le chlore ne put isoler Mn de l'oxyde de Mn qu'il traitait (1771). Le Dr *Gahn*, en 1774, fut plus heureux et produisit le premier du Mn métallique. *Marshall Heath* put le préparer de façon à pouvoir l'utiliser industriellement en 1839 ; nous en reparlerons dans l'étude des procédés de fabrication.

Il n'existe cependant pas de procédé vraiment industriel de production de Mn métallique ; mais celui du Fe-Mn suffit largement aux besoins d'utilisation de ce corps.

Le Mn a une grande affinité pour l'oxygène et c'est là une des propriétés caractéristiques mises à profit dans la métallurgie de l'acier.

Nous retiendrons donc que le *manganèse est un réducteur puissant.*

2° *Le peroxyde de manganèse.* — Le peroxyde de manganèse MnO^2 domine presque toujours dans les minerais où il est souvent associé à une certaine quantité de MnO.

Par le grillage à une chaleur inférieure au rouge, il se décompose suivant la réaction bien connue :

$$3MnO^2 = Mn^3O^4 + 2O \text{ (préparation de l'oxygène).}$$

3° *L'oxyde rouge.* — L'oxyde rouge Mn^3O^4 est le produit final du grillage de tous les oxydes de manganèse. C'est à l'état d'oxyde rouge que s'effectue une bonne partie du déchet en manganèse dans la fabrication industrielle des ferro-manganèses, ainsi que nous le verrons plus loin.

4° *Le protoxyde MnO.* — Le protoxyde MnO est le terme final de l'action réductrice exercée par H ou CO sur tous les autres oxydes de manganèse.

On verra que ce n'est qu'au contact du carbone et dans des conditions spéciales que MnO peut être réduit.

L'affinité de cette base pour la silice est telle qu'on ne peut songer à la réduire complètement en sa présence.

D. — *Principes généraux de fabrication.* — Un grand nombre de minerais de fer contient du manganèse. Quelques minerais de fer sont particulièrement riches en manganèse ; le minerai spathique du pays de *Siegen*, par exemple. D'autres minerais contiennent, au contraire, peu de fer et beaucoup de manganèse ; on peut à bon droit les appeler *minerais de manganèse.*

Pour introduire du manganèse dans le lit de fusion du haut-fourneau, on compose les charges soit avec du minerai de fer manganésé, soit en mélangeant des minerais de fer plus ou moins riches en manganèse avec des minerais de manganèse.

C'est à l'état de MnO^2 mélangé avec un peu de MnO qu'on rencontre le plus souvent le manganèse dans les minerais.

Suivons la réduction de MnO^2 dans la colonne descendante des charges :

a) *MnO^2 devient Mn^3O^4.* — MnO^2 est, on le sait, très aisément décomposable à chaleur modérée. A quelques mètres au-dessous du gueulard la transformation en Mn^3O^4 s'effectue.

Or, la réaction : $3MnO^2 = Mn^3O^4 + 2O$, s'accomplit avec dégagement d'O ; cet O se porte sur le coke en présence et le brûle en partie. D'où, formation près du gueulard d'une couche incandescente de coke.

b) *La formation de Mn^3O^4 est coûteuse.* — Et, en effet, en se réduisant plus bas dans sa marche descendante, Mn^3O^4 concourt à la formation de CO^2 ; comme nous le verrons. Or, cet acide carbonique rencontrant la couche de coke incandescent se transforme en CO suivant la réaction : $CO^2 + C = 2CO$. Il y a, par suite, perte inutile de combustible.

Pour éviter cette formation d'un foyer nuisible, *M. Ferd. Gautier* propose le grillage préalable du minerai par un procédé peu coûteux, en utilisant une partie des gaz du gueulard par exemple. Il ne semble pas que les usines aient recours d'une façon courante à ce procédé.

c) *Mn^3O^4 devient MnO.* — En continuant sa marche, Mn^3O^4 rencontre

forcément CO dans les régions chaudes du haut-fourneau et alors il se transforme en MnO d'après la réaction :

$$Mn^3O^4 + CO = 3MnO + CO^2.$$

C'est cet acide carbonique formé ainsi qui se transformera plus haut en CO occasionnant la perte de combustible que nous avons signalée.

d) MnO ne se réduit qu'au contact du carbone. — Tandis que sous l'action des gaz réducteurs, MnO^2 se transforme en MnO sans produire du manganèse métallique, les oxydes de fer, au contraire, peuvent être réduits complètement en donnant du fer métallique.

La réduction finale de MnO en Mn métallique ne se fait qu'au contact du carbone, il est même à présumer que la présence du fer métallique la favorise.

Produit au niveau des tuyères et protégé contre l'action oxydante par le laitier qui l'enveloppe et probablement aussi par la présence du fer carburé, il tombe dans le creuset en même temps que celui-ci.

Dans ses *Essais par la voie sèche*, *Berthier* dit :

« Le fer, par l'affinité qu'il a pour le manganèse, facilite la réduction des oxydes de ce métal au contact du carbone ».

Nous avons dit plus haut combien était grande l'affinité de MnO pour SiO^3.

Il n'en est pas de même du protoxyde de fer que la chaux déplace aisément de ses combinaisons silicatées.

Quand le lit de fusion est riche en manganèse, on ne peut, d'après M. Gautier, obtenir pratiquement des *laitiers ayant moins de 8 à 10 de manganèse métal en présence de 28 à 30 de silice*, c'est-à-dire en nombres ronds : 1 de manganèse métal pour 3 de silice.

On aura donc toujours dans cette fabrication une première perte minima en manganèse qui vaudra $\frac{S}{3}$; si S est la quantité de silice du lit de fusion.

Nous disons *minima*, car si la température du haut-fourneau vient à baisser, une moins grande quantité de MnO pourra être réduite par le carbone en présence du fer carburé et le laitier s'enrichira de plus en plus en protoxyde de manganèse.

Il y aura donc deux moyens de combattre la perte de manganèse par passage au laitier de MnO :

a) **Rechercher les minerais les moins siliceux**, et pour cela dans

l'achat des minerais de manganèse on est souvent conduit à fixer une pénalité par chaque unité 0/0 au-dessus d'une certaine moyenne pratique déterminée ; mais il y a cependant une teneur minima au delà de laquelle on ne peut descendre, sinon les laitiers sont difficilement fusibles.

b) **Réaliser des laitiers ultra-basiques** et pour cela, employer comme fondant surtout la chaux ; mais on ne peut l'employer seule, car les laitiers seraient très réfractaires. La dose de chaux doit être maintenue dans les limites de 40 à 45 0/0. Nous savons que forcément MnO y entrera pour 8 à 10 0/0 ; on ajoutera de l'alumine et de la magnésie pour parfaire le reste. La baryte pourra même être utilisée pour donner de la fluidité au laitier.

La silice pourra alors se combiner en majeure partie à ces bases et laisser libre pour la réduction une certaine quantité de MnO.

Il ne suffit pas d'empêcher MnO de passer au laitier par sa réaction avec la silice, il faut aussi pouvoir le réduire : or, pour cela, il faut une très haute température. Si cette condition ne se trouve pas réalisée, on aura beau surcharger en manganèse le lit de fusion, on atteindra bientôt une teneur limite de manganèse dans la fonte qu'on ne pourra dépasser, quelle que soit la richesse croissante du lit de fusion.

Et ce qui fait qu'on n'a pu réaliser qu'après de nombreux essais une fabrication courante de ferro-manganèse riche, c'est qu'on n'a pas tenu compte de la grande quantité de chaleur nécessaire à la réduction de l'oxyde de manganèse.

Plus la teneur recherchée en manganèse était grande, plus forte devait être la proportion du poids de combustible par rapport à celui de la charge.

Pour faire une tonne de manganèse métallique (c'est-à-dire *pour couler une quantité de Fe-Mn telle qu'elle corresponde à une tonne de Mn*) il faut *trois tonnes de coke*, tandis qu'il faut *une tonne de coke* pour faire une tonne de fonte ordinaire avec des minerais riches.

Il y a longtemps qu'on a constaté que les cheminées des hauts-fourneaux marchant en ferro-manganèse laissent échapper des fumées roussâtres. Ces fumées tiennent en suspension des poussières de Mn^3O^4. On l'explique comme il suit :

Les gaz sortant du gueulard sont, comme on sait, brûlés sous les chaudières des machines soufflantes et dans les appareils à air chaud ; or, si les gaz ainsi brûlés renferment, lors de leur évacuation par la

cheminée, des poussières de Mn^3O^4, ce ne peut être que parce que ces gaz renfermaient à leur sortie du haut-fourneau avant leur combustion: soit des poussières de Mn métallique, soit du protoxyde de Mn à l'état très divisé.

Ces fumées manganésifères provenant de l'entraînement de Mn ou de MnO *éliminent* en moyenne 10 0/0 de la quantité de manganèse du lit de fusion.

E. — *Historique de la fabrication.* — Le cadre restreint de notre étude ne nous permet pas de nous étendre sur ce côté si intéressant de la question. Nous devrons nous borner à un exposé rapide.

Après les essais de Marshall Heath, en 1839, apparaissent les fontes spéculaires du pays de Siegen (Prusse). Ces spiegeleisen contenaient de 5 à 12 0/0 de manganèse.

En 1856, Robert Mushet utilise le premier ces fontes spéculaires comme réactif dans un procédé industriel de fabrication d'acier (acier Bessemer).

La nécessité d'avoir des alliages métalliques plus riches en Mn se fait bientôt sentir; Bessemer produit au creuset un ferro-manganèse à 60 0/0 par mélange intime de grenailles de fonte, d'oxyde de manganèse, de verre pilé et de charbon de bois en poudre.

Le chimiste Henderson, de Glasgow, et plus tard la compagnie de Terre-Noire (Loire), employèrent une sole en carbone de four Siemens et réduisirent à l'aide du charbon par des procédés que nous ne décrirons pas un mélange d'oxyde de fer et d'un carbonate artificiel de manganèse provenant du traitement des résidus manganésifères de la fabrication du chlore.

On était arrivé, en 1874, à produire du ferro-manganèse à une teneur maxima en manganèse de 50 0/0; mais à un prix fort élevé.

A l'Exposition universelle de Vienne, en 1873, on remarquait du ferro-manganèse obtenu dans les hauts-fourneaux de Suède à 20 0/0 de Mn; on y remarquait également du ferro-Mn obtenu aux hauts-fourneaux de Jauerburg (Carniole, Haute Vallée de la Save) à 33 0/0 de Mn.

On atteignait plus tard à ces mêmes hauts-fourneaux une teneur de 40 0/0.

Il semblait démontré qu'il fallait attribuer à la haute température due à l'excès du coke, l'enrichissement de plus en plus grand de la fonte en manganèse; chose qu'on paraissait ignorer dans le pays de

Siegen puisqu'on ne parvenait pas à enrichir les spiegels en manganèse, malgré la surcharge du lit de fusion en minerai de manganèse. — Ces ferro-manganèses riches obtenus au haut-fourneau revenaient bien moins cher que ceux obtenus à l'aide du creuset ou de la sole en carbone d'Henderson.

En France, on commença, dès 1874, des essais de fabrication de Fe-Mn au haut-fourneau.

M. Forey, directeur des hauts-fourneaux de Montluçon, réalisa le premier du spiegel riche à 26 0 0 de Mn.

Au milieu de 1875, M. Pourcel abandonnant à Terre-Noire la fabrication Henderson, obtint au haut-fourneau du Fe-Mn à 63 0 0, 75 0 0 et 80 0 0.

Dans cette même année M. Jordan à Saint-Louis (près Marseille) entreprenait la même fabrication.

Les progrès furent extrêmement rapides.

En Allemagne la fabrication commença dès 1877.

Les usines s'occupant actuellement de cette fabrication encore onéreuse, à cause de l'excessive consommation de combustible, sont en nombre assez limité ; elles suffisent du reste largement à la consommation bien répandue, il est vrai, du ferro-manganèse, mais d'un tonnage relativement restreint, puisque cette fonte ne sert que comme véhicule du manganèse pour réagir sur les aciers en élaboration ou pour leur donner par son incorporation des propriétés caractéristiques.

II. — Le Ferro-silicium. (Fe-Si)

A. — *Définition des ferro-silicium.* — Le ferro-silicium est une fonte très riche en silicium dont la teneur est, en général, voisine de 10 0 0, elle peut aller exceptionnellement à 15 0 0.

La texture des ferro-silicium ressemble beaucoup à celle des fontes grises chargées de graphite ; leur couleur de même.

B. — *Principes généraux de fabrication.* — Avec un lit de fusion convenable tous les minerais peuvent servir à cette fabrication, si on se conforme toutefois aux prescriptions fondamentales que nous énumérerons plus loin. Exception, cependant, est faite pour les minerais trop calcaires dont l'excès de chaux retiendrait trop aisément la silice dans le laitier et en empêcherait la réduction.

Les minerais à silice libre sont très aisés à traiter par la raison que la séparation de SiO^3 d'avec les bases avec lesquelles elle est ordinairement associée est déjà faite ; mais ce serait une erreur de croire qu'il en faille un grand excès, car le laitier serait trop fusible.

Les minerais alumineux sont faciles à traiter, car l'alumine diminuera dans le laitier la proportion des bases fortes qui retiendraient trop la silice ; il se formera avec la chaux un aluminate de chaux laissant SiO^3 libre en partie pour être aisément réduite sous la double affinité du carbone et du fer.

On peut ajouter au lit de fusion ordinaire du haut-fourneau le silicium non plus sous forme de silice libre, mais sous forme de silicates de fer artificiels.

Ces silicates de fer artificiels compris sous le nom de générique de *scories* constituent un déchet des opérations de fabrication de fer ou d'acier, soit au puddlage, soit au four *Martin*, soit au *Bessemer*.

Nous les avons signalés comme utilisables dans l'énumération des divers minerais de fer.

La fabrication du ferro-silicium par réduction du silicate de fer artificiel en présence d'une faible quantité de chaux et d'une notable proportion d'alumine est d'une pratique courante en *Angleterre*.

En allure ordinaire, ces produits donnent des fontes blanches parce que la réduction n'est pas complète. Il reste alors de l'oxyde de fer dans le laitier qui retient la majeure partie de la silice ; celle-ci n'étant pas réduite, il y a peu de silicium dans la fonte, par suite pas de graphite.

En allure chaude et avec un laitier réfractaire, il y a réduction de l'oxyde de fer et alors la silice se trouvant à l'état naissant vers le bas du fourneau se réduit facilement, surtout si le laitier est alumineux et pas trop calcaire.

Le ferro-silicium contient souvent du manganèse ; les silicates de fer artificiels employés sont, en effet, toujours plus ou moins manganésés. Pour les usages courants, il ne doit pas en contenir plus de 2 0/0 ; une plus grande quantité, pour son emploi en fonderie notamment, irait à l'encontre de ce que l'on recherche par l'addition du ferro-silicium.

De plus, un peu de manganèse est même utile, car l'élimination du soufre à l'état de sulfure de manganèse est facilitée. Or, avec un lit de fusion peu calcaire, on sait que cette élimination est difficile.

Nous venons de voir qu'il faut des laitiers alumineux puisque l'alumine, base très faible, ne retient pas énergiquement la silice et s'oppose moins

que la chaux à la réduction du silicium. Or, ces laitiers alumineux ont peu de fluidité ; il sera par suite utile d'ajouter au lit de fusion quelques bases les rendant plus fluides : baryte et magnésie surtout. Le lit de fusion n'en restera pas moins réfractaire et ces bases, ajoutées en petite quantité, n'agiront sur la fluidité du laitier que quand il sera formé.

Il faudra donc marcher en allure chaude, soit avec de l'air aussi chaud que possible et une dose de coke de deux tonnes au moins par tonne d'alliage ; on pourra même aller à trois tonnes.

En résumé, marcher en allure très chaude et constituer des laitiers réfractaires et pas trop basiques c'est-à-dire sans excès de CaO afin d'isoler SiO^2.

Le laitier est entraîné sous l'action du vent venant des tuyères.

Il en résulte, comme dans l'industrie du Fe-Mn, des encombrements dans les conduites, appareils à air chaud, etc... Ces poussières exigent des nettoyages plus fréquents, nuisent à la conductibilité calorifique des briques des appareils, produisent des engorgements, etc...

C. — *Historique de la fabrication.* — En 1872, M. Valton entreprend aux aciéries de Terre-Noire les premiers essais de fabrication du Fe-Si ; ces essais se bornent à des recherches au creuset. Il parvient en employant l'oxyde de fer ou la fonte, SiO^3 et le charbon, à avoir un Fe-Si à 10 et 12 0/0 de Si.

En 1875, M. Pourcel, successeur de M. Valton à l'aciérie de Terre-Noire, entreprit au haut-fourneau la fabrication industrielle du Fe-Si en vue d'obtenir une fonte devant lui servir de réactif pour obtenir des aciers sans soufflures, c'est-à-dire des aciers compacts, sans interposition de bulles de gaz après la coulée. Il y réussit assez rapidement.

Originaire de France, la fabrication des ferro-silicium, localisée à l'usine de Saint-Louis du Rhône (près Marseille), se fait surtout en Angleterre.

Cela tient à la grande quantité de coke nécessaire à cette industrie ; quatre à cinq usines suffisent actuellement à la consommation en Fe-Si du monde entier.

III. — *Le silico-spiegel ou ferro-manganèse-silicium*

A. — *Définition du silico-spiegel ou ferro-manganèse-silicium.* — Le silico-spiegel, employé de préférence pour certaines fabrications

d'acier, est un alliage de fer, de 8 à 12 0/0 de Si et de 15 à 20 0/0 de Mn.

Sa texture est celle des fontes siliceuses avec très peu de carbone combiné.

En réalité, le Fe-Si fabriqué en 1875 aux hauts-fourneaux de Terre-Noire par M. Pourcel n'était pas un ferro-silicium à proprement parler, mais du Fe-Mn-Si à cause de la grande proportion de Mn que contenait cette fonte spéciale dont le dosage correspondait à 7 0/0 de Si et 12 0/0 de Mn.

On exposera à l'étude des procédés de fabrication qu'il n'est pas indifférent de réunir dans une même fonte le manganèse et le silicium plutôt que d'utiliser simultanément le ferro-manganèse et le ferro-silicium.

B. — *Principes généraux de fabrication.* — Cette fabrication présente de grandes difficultés ; car, il faut amener dans l'alliage final le silicium et le manganèse en fortes proportions, c'est-à-dire réduire dans le haut-fourneau SiO^3 et MnO.

Or, on connaît l'affinité de la silice pour l'oxyde de manganèse ; il y a donc tout lieu de croire, à priori, qu'une pareille tentative ne peut conduire qu'à une marche en laitier de silicate de manganèse.

Pour avoir du manganèse en proportion notable dans la fonte *(Voir la fabrication des ferro-manganèses)*, on sait, d'une part, que le minerai doit contenir un minimum de silice et que le fondant employé doit néanmoins contenir une quantité importante de chaux.

Pour avoir, d'autre part, du silicium en proportion notable dans la fonte *(voir fabrication des ferro-silicium)*, on sait qu'il ne faut pas excès de chaux dans le lit de fusion.

Ces conditions sont donc contradictoires ; une seule condition est commune aux deux fabrications séparées du ferro-Mn et du ferro-Si, c'est celle d'une haute température à réaliser au haut-fourneau.

On y arrive néanmoins en consentant à de grandes pertes en manganèse, en forçant sa proportion dans le lit de fusion et en prenant des conditions moyennes entre les conditions imposées pour avoir un bon rendement dans les fabrications séparées du ferro-Mn et du ferro-Si.

Par suite : allure très chaude et laitiers moyennement basiques.

On opère, en outre, sur des charges très réduites. De ce fait, il y a excès de combustible par rapport aux matières du lit de fusion ; ces matières arrivent bientôt à un contact assez intime avec ce combustible.

Il en résulte dans les régions chaudes une plus grande facilité de réduction locale de SiO^3 et de MnO. On conçoit donc qu'il puisse y avoir incorporation simultanée de Si et de Mn dans la fonte, en dehors des motifs déjà donnés plus haut.

Pour toutes ces causes, une pareille fabrication est fort coûteuse ; elle est par suite limitée à un nombre très restreint d'usines.

M. *Ferdinand Gautier* donne la composition suivante du lit de fusion pour une tonne de silico-spiegel à 20 0/0 de Mn, 10 à 12 0/0 de Si et 2 à 3 0/0 de C :

Coke	2500 k.	SiO^3 combiné . . .	420
Peroxyde de fer . .	940	Carbonate de CaO .	460
MnO^2	570	Sulfate de baryum .	190
SiO^3 libre	350		

IV. — *Digression sur la métallurgie du silicium.*

Nous ne pouvons passer sous silence les recherches récentes concernant la métallurgie du silicium. Renonçant à préparer le silicium par la méthode de *Berzélius*, soit en faisant réagir les métaux alcalins sur le fluosilicate de potassium, *M. Vigouroux*, docteur ès-sciences, s'est proposé de préparer le silicium en faisant agir directement les réducteurs sur la silice. Nous citerons l'*aluminium* et le *magnésium* comme principaux réducteurs employés : ces réducteurs pulvérisés sont chauffés mélangés avec la silice, à 800°. En traitant le produit obtenu par les acides chlorhydrique, sulfurique et fluorhydrique, on récupère du silicium amorphe. L'avantage de la méthode nouvelle est de procurer le corps en question dans un très grand état de pureté et débarrassé des siliciures métalliques qui l'accompagnaient dans son élaboration par l'ancien procédé.

Quant au silicium cristallisé qu'on ne peut obtenir qu'en portant la masse à une température très élevée susceptible de fondre la silice, *M. Vigouroux* a pu le préparer au four électrique de *M. Moissan* en réduisant la silice par l'aluminium et en graduant le chauffage de façon à réaliser la cristallisation soit par dissolution, soit par fusion, soit par distillation.

Les propriétés de ces deux formes du silicium sont identiques et si des différences avaient été constatées autrefois il y a lieu de les attribuer au défaut de pureté des corps obtenus.

Mais ce qui peut jeter quelque lumière sur l'état du silicium dans les fontes et dans les aciers, c'est la seconde partie du travail de *M. Vigouroux* ayant trait aux siliciures métalliques. Pour lui, la formule générale des siliciures métalliques serait M^2Si, M étant un élément divalent : certains de ces siliciures dissolvent le silicium et un tel mélange attaqué par un acide donne à la fois du silicium cristallisé et de la silice provenant du silicium combiné. Il y a là, dit *M. Charpy* analysant dans la Revue générale des sciences (janvier 1897) les travaux de *M. Vigouroux*, « *une propriété intéressante à rapprocher de celle du carbone* « *qui, dans la fonte, par exemple, se trouve à la fois à l'état de gra-* « *phite et de carbure de fer.* »

V. — *Le ferro-chrome* (Fe-Cr).

Nous commencerons d'abord par l'historique du ferro-chrome, afin de rendre plus clair dans ce cas particulier l'exposé de sa fabrication.

A. — *Historique de l'utilisation du chrome en sidérurgie.* — Les alliages de fer et de chrome plus ou moins carburés sont connus depuis longtemps comme produits de laboratoire.

1° *Découverte de Berthier.* — La découverte de ces composés est due à *Berthier* comme le prouve un mémoire publié en 1820 : insistant sur la manière de produire le ferro-chrome, il prédit qu'on s'en servira pour introduire le chrome dans l'acier fondu.

Berthier fit même deux aciers chromés fondus, l'un contenant 0,010 de chrome, l'autre 0,015. Ces aciers se forgèrent très bien, on en fit un couteau et un rasoir : les deux lames étaient très bonnes.

2° *Fabrication en Amérique et notamment aux Etats-Unis.* — En 1866-1867, dans la province d'Antioquia (Amérique méridionale), une compagnie monta une forge dans les environs de Medellin où l'on traitait un minerai brun ayant l'aspect d'une hématite. La fonte que l'on retirait était surtout employée à faire des têtes de bocard pour pulvériser des quartz aurifères : par sa dureté exceptionnelle, elle convenait parfaitement à cet usage, et malgré son prix élevé, elle était fort recherchée. *Boussingault* constata durant son séjour dans cette province que c'était à la présence du chrome (3 à 4 0/0) qu'il fallait attribuer ces remarquables propriétés.

Du reste, le minerai de chrome existait en abondance dans le terrain

sur lequel l'usine avait été construite, à ce point que les pierres formant les murs d'angle des maisons étaient des blocs taillés de minerai de chrome.

Ainsi, dans le courant des années 1866-1867, une fonte chromée était sortie des hauts-fourneaux de l'Amérique méridionale.

Par suite d'un brevet pris en 1869 par M. Julius *Bauer*, on fabriqua de l'acier chromé et du ferro-chrome à Brooklyn, dans l'état de New-York.

A partir de cette époque on fabrique aux Etats-Unis des produits chromés et on prend des brevets sans se préoccuper de ce qui a été fait antérieurement. Il semble toutefois, d'après les résultats de *Medellin*, que l'obtention d'une fonte chromée était tombée dans le domaine public. Cependant, c'est aux Etats-Unis qu'on produit en premier lieu les fontes et les aciers chromés pour l'industrie sur une échelle un peu considérable.

3° *Travaux de M. Brustlein* (1). — M. *Brustlein*, Ingénieur-directeur des aciéries *Jacob-Holtzer* à *Unieux* (Loire), a été en France le créateur de la fabrication vraiment industrielle des produits chromés. Ce savant ingénieur, ayant lu qu'on avait fait à Brooklyn des aciers chromés de grande résistance, se livra à des essais de fabrication dès 1875. Comme conséquence de ces essais l'usine commença, en 1877, à livrer de l'acier chromé à ses clients et, depuis lors, la consommation s'étendit de plus en plus.

Nous pouvons dire, sans anticiper sur l'histoire de l'acier chromé, que l'introduction du chrome a procuré aux produits sidérurgiques deux importants débouchés : soit dans la fabrication des aciers à outil, soit dans celle des aciers pour obus de rupture, tôles résistantes et plaques de blindage.

C'est en présence des résultats obtenus par M. *Brustlein* que d'autres aciéries entrèrent dans la même voie, mais c'est lui qui, le premier en Europe, put produire ces nouveaux métaux d'une façon pratique. Il a ainsi créé une branche nouvelle à notre industrie et l'exploitation de cette branche n'a pas été sans un très grand profit pour les usines du bassin de la Loire notamment.

(1) Consulter au sujet du « *ferro-chrome* » l'étude de M. Brustlein à laquelle nous avons eu amplement recours (Bulletin de la Société de l'industrie minérale 1889), les Annales de physique et chimie (aciers chromés par *Boussingault*), les Annales des mines (aciers chromés par M. l'ingénieur *Rolland*).

B. — *Propriétés du ferro-chrome.* — Le ferro-chrome ou fonte chromée s'emploie pour introduire de petites doses de chrome dans les aciers.

1° *Définition du ferro-chrome.* — Le chrome semble se combiner facilement et en toutes proportions avec le fer au moins jusqu'à 80 0/0 et élève considérablement le point de saturation du carbone dans le fer; bien plus, en tout cas, que le manganèse.

Aussi les ferro-chromes peuvent-ils contenir une bien plus forte proportion de carbone que les ferro-manganèses.

Le silicium peut aussi y figurer pour une très petite proportion; dans ce cas, l'alliage prend souvent le nom de silico-ferro-chrome.

Il ne semble pas que la richesse en silicium puisse dépasser 8 à 10 0/0.

	CHROME	CARBONE	SILICIUM	MANGANÈSE
Spécimens des teneurs en Cr et C, ou en Cr, C. Si, ou en Cr, C, Si et Mn d'échantillons de ferro-chromes ou silico-ferro-chromes fabriqués aux aciéries d'*Unieux*.	7	4,5	0,25	0,36
	7	5	0,4	0,38
	16	2,7	non indiqué	non indiqué
	30	4,7	—	—
	30	carbone à saturation	—	—
	30	5	8	—
	42	7,3	2,1	0,4
	50	8	non indiqué	non indiqué
	60	8,6	—	—
	71,5	3,46	—	—
	80	11	—	—
	82	7,5	8,2	—

2° *Aspect à la cassure.* — L'aspect à la cassure des ferro-chromes varie bien plus avec la teneur en C et en Si qu'avec leur teneur en Cr. Aussi, est-il fort difficile d'apprécier, à la vue, la teneur en chrome d'un ferro-chrome saturé de C ou de C et de Si.

Fortement chargés en C ou en C et Si, ils ont toujours une tendance à avoir une structure aiguillée et sont durs et fragiles.

A mesure que la teneur de ces deux métalloïdes diminue, la dureté et la fragilité diminuent. Au lieu de la structure aiguillée, on voit apparaître de petites facettes constituées par de petits clivages rectangulaires ou petites tables disposées en escalier; ce qui donne à la cassure un aspect chatoyant suivant l'angle sous lequel on les regarde.

Ainsi l'échantillon du tableau précédent à 71,5 0/0 de Cr et à 3,46 0/0 de C a une cassure à petites facettes et non aiguillée; il en est de même de celui à 16 0/0 de Cr et à 2,7 0/0 de C.

l était intéressant de rechercher l'aspect à la cassure des ferro-omes pauvres et saturés de carbone. Or, ces fontes n'ont pas pré-té de facettes pour peu qu'il y eût une certaine quantité de silicium. en conclut que la tendance du chrome à donner de la fonte spécu-e est faible : des spiegels à teneur équivalente en manganèse pré-teraient, au contraire, les grandes facettes caractéristiques de ces tes spéciales.

° *Conséquences résultant de la texture.* — Le résultat précédent important à retenir, car il permet de prévoir que le chrome ne pré-tera pas dans les aciers carburés les mêmes inconvénients que le nganèse. Les énormes clivages caractérisant le spiegel enlèvent à e fonte toute solidité : l'expérience a prouvé que dans un acier *buré* le manganèse en favorisant le développement cristallin le rend s fragile.

.es aciers ne différant des fontes que par une proportion moindre corps étrangers alliés au fer, il est naturel que ces corps conservent s les propriétés qu'ils communiquent à l'acier une certaine analogie c celles qu'ils donnent à la fonte.

.es fontes chromées carburées étant plus résistantes que les spiegels, aciers chromés devront être plus résistants que les aciers manga-és carburés.

.'expérience a confirmé cette prévision : on peut introduire dans les rs des proportions très variables de chrome dont l'effet est d'aug-nter la résistance de l'acier sans diminuer la ténacité correspondant a teneur en carbone; même il semble plutôt augmenter légèrement e ténacité.

° *Action sur l'aiguille aimantée.* — Un ferro-chrome riche en ome agit moins sur l'aiguille aimantée sans que l'action magné-ne disparaisse complètement, ainsi qu'il advient au ferro-manga-e. Certains ferro-chromes sont cependant à peine attirables à l'ai-nt; cela tient à la teneur élevée qu'ils possèdent en carbone et en ium.

e sont donc surtout le carbone et le silicium qui, dans ces fontes, trarient l'action de l'aimant.

.'échantillon de Fe-Cr à 71,5 0 0 de Cr et 3,46 0 0 de C est très rable à l'aimant; l'échantillon à 82 0 0 de Cr, 7,5 de C et 8,2 de 'est à peine.

C. — *Principes généraux de la fabrication.* — Nous passerons successivement en revue quelques procédés de fabrication.

1° *Procédé de Berthier.* — Dans son mémoire de 1820, *Berthier* s'exprime ainsi :

« En chauffant très fortement dans un creuset brasqué un mélange « en proportion quelconque d'oxyde de chrome et d'oxyde de fer, ces « oxydes sont complètement réduits et l'on obtient des combinaisons « parfaitement homogènes des deux métaux..... etc... Si l'alliage de fer « et de chrome peut être de quelque utilité dans les arts, on l'obtiendra « avec beaucoup d'économie en substituant le minerai de chrome (*fer « chromé des minéralogistes*) à l'oxyde de chrome pur. »

Les essais tentés par *Berthier* pour obtenir cet alliage par cette voie offrirent de sérieuses difficultés dues à ce qu'il entre dans la constitution des minerais : Al^2O^3, MgO, SiO^2 et autres matières très réfractaires; les nombreux fondants qu'il essaya ne lui donnèrent pas d'excellents résultats.

2° *Procédé américain primitif.* — Mêler le minerai de chrome réduit en poudre fine avec 6 à 8 0/0 de charbon de bois ou d'anthracite pur et une certaine quantité de fondants, NaFl ou CaFl, avec une certaine quantité de chaux, ou bien du borax avec un carbonate alcalin.

En fondant à une très haute température dans des creusets en graphite, on obtient un régule rassemblé sous la scorie.

A Brooklyn on a obtenu aussi des Fe-Cr dont la teneur en Cr a varié de 20 à 70 0/0.

La *Tasmanian Iron and C°* obtenait au haut-fourneau des fontes renfermant de 6 à 7 0/0 de chrome.

3° *Procédés actuels.* — Le Fe-Cr se fabrique au haut-fourneau, au four à manche ou au cubilot et au creuset.

A l'origine de la fabrication des aciers chromés à l'usine d'*Unieux* (Loire), les ferro-chromes riches n'existant pas et cette usine ne possédant pas de hauts-fourneaux, on dut avoir recours à la réduction du sesquioxyde de chrome presque pur dans des creusets brasqués ou en graphite. Nous n'en parlons que pour mémoire quoique ce procédé puisse être employé dans les aciéries au creuset.

Plus tard, on a produit au haut-fourneau ou au cubilot des ferro-chromes ayant jusqu'à 60 et 62 0/0 de Cr.

a) **Fabrication au haut-fourneau.** — La réduction du minerai de Cr

s'effectue toujours presque complètement à la faveur d'une très haute température, il en passe très peu au laitier.

Le minerai de chrome étant très réfractaire, il est bon de le pulvériser et de l'agglomérer avec de la chaux pour aider à la fusion.

On emploie des laitiers réfractaires et calcaires ou alumineux. Les laitiers calcaires sont préférables parce qu'ils facilitent l'élimination du soufre.

Les ferro-chromes sont peu fusibles, surtout quand la teneur en chrome atteint et dépasse 40 0/0. La fonte peu fluide s'écoule difficilement hors du creuset ; le haut-fourneau lui-même a tendance à s'engorger.

b) **Fabrication au cubilot.** — Pour les ferro-chromes à haute teneur en Cr, c'est-à-dire à teneur supérieure à 40 0/0 et pouvant aller à 60 ou 65 0/0, on se sert d'un cubilot à revêtement basique peu épais, refroidi extérieurement et soufflé à l'air chaud.

Pour les fortes teneurs, on a une masse tellement pâteuse qu'on ne peut songer à la couler ; aussi, après avoir laissé refroidir la fonte chromée démolit-on le creuset bâti indépendamment de la cuve. Le culot de ferro-chrome est déplacé, si c'est possible, ou brisé sur place dans le cas contraire.

On peut aussi avoir recours à un creuset mobile qui, une fois rempli, est déplacé et vidé.

Pour des teneurs de 60 et 65 0/0 de Cr, il faut traiter du fer chromé absolument pur correspondant à la formule théorique FeO, Cr^2O^3.

Cette fabrication est très onéreuse, tant à cause du prix relativement élevé des minerais de chrome purs, de la quantité de coke à brûler, etc... que des difficultés de fabrication que nous signalons seulement.

VI. — *Autres fontes spéciales.*

Les autres fontes spéciales utilisées en sidérurgie sont :

Le ferro-tungstène. — Le ferro-aluminium et naguère le ferro-nickel.

a) Le ferro-tungstène. — Le ferro-tungstène est utilisé comme fonte d'apport, c'est-à-dire pour introduire du tungstène dans les aciers à l'effet de leur communiquer des propriétés spéciales. Préparé au creuset, il se présente souvent sous la forme d'une masse foncée, lourde, légèrement concrétionnée. On l'obtient assez facilement en chauffant long-

temps le *wolfram* (tungstate double de manganèse et de fer) ou la *scheelite* (tungstate de chaux) avec du fer ou de l'oxyde de fer dans un creuset brasqué ; après avoir, toutefois, grillé le minerai pour en chasser le soufre et l'arsenic et l'avoir aussi lavé et pulvérisé.

On fabrique encore le ferro-tungstène au haut-fourneau en introduisant une certaine proportion des minerais précités dans le lit de fusion. Il faut réaliser des dosages ultra-basiques et constituer le creuset en matériaux capables de résister aux actions corrosives très énergiques qui se produisent dans cette fabrication. Pour ce motif, on emploie généralement le graphite : cette solution est souvent adoptée dans la fabrication des ferro-chromes et des ferro-manganèses riches.

Le tungstène élève beaucoup le point de fusion du fer, aussi fait-on rarement des ferro-tungstènes à plus de 40 0 0, sauf, toutefois, si on opère au cubilot ou au creuset.

Quand on traite le wolfram, le manganèse est presque toujours associé au tungstène dans la fonte : on fait couramment des ferro-tungstènes à 20 ou 25 0 0 de tungstène, 30 à 40 0 0 de Mn et 4 à 5 0/0 de carbone. Ces fontes se présentent sous l'aspect de fontes blanches, finement grenues et même à cassure presque unie.

b) *Le ferro-aluminium.* — Le ferro-aluminium sert pour introduire de l'aluminium dans les fontes afin de leur donner des propriétés spéciales.

L'aluminium a sur les fontes une action assez analogue à celle du silicium, mais il est beaucoup moins nuisible à la ténacité.

On ajoute du ferro-aluminium aux fontes destinées à être moulées. C'est un moyen commode de précipiter le carbone et de rendre fluides, sans être obligé de les refondre, les fontes blanches.

L'aluminium paraît donner aux fontes une structure plus compacte.

Pour fabriquer le ferro-aluminium on peut faire dissoudre dans un bain de fonte ou d'acier en fusion une certaine quantité d'aluminium préparé, d'autre part, par des procédés spéciaux dont nous ne pouvons parler ici, car ils ressortissent actuellement à *l'électro-métallurgie*.

Mais le ferro-aluminium ou mieux l'aluminium préparé isolément constitue un réactif dans la métallurgie de l'acier ; nous verrons combien son rôle est important dans la fabrication des aciers sans soufflures où il agit comme agent raffineur en s'emparant de l'oxygène.

c) *Le ferro-nickel.* — Nous avons déjà donné les raisons pour lesquelles les fontes nickelifères n'étaient plus fabriquées aujourd'hui.

Le nickel élaboré d'après une métallurgie spéciale est incorporé irectement dans les appareils d'affinage, comme il sera indiqué ltérieurement ; il n'agit pas comme réactif mais par sa présence même, n donnant à ces métaux des propriétés caractéristiques.

VII. — *Exemples de composition de fontes spéciales.*

Nous donnons ci-dessous, et *pour mémoire*, quelques types de fontes péciales ; ces exemples serviront à se rendre compte d'une manière uffisante de leur pourcentage en éléments étrangers. Nous les emprunons aux différents mémoires ou études déjà cités.

A. — *Ferro-manganèse.* — Nous savons que l'origine des fontes raiment riches en manganèse est le pays de *Siegen* (Prusse). Voici la omposition du minerai qui y était exploité : le minerai spathique du *Stahlberg*, près *Müsen* contient en moyenne :

FeO.	45 à 47	0/0
MnO	9,5 à 10,6	—
MgO	1,6 à 3,2	—
CaO.	0,5 à 1	—
SiO^3.	3 à 1	—
CO^2.	37 à 39	—

a) Spiegels.

Spiegel à 8 0/0		*Spiegel à 20 0/0*	
Mn	8,70 0/0	Mn	20,60 0/0
Fe.	85,91	Fe.	74
C dit combiné.	4,12	C dit combiné.	4,90
S	0,01	Si.	0,20
Traces de Ph, Cu, etc...		Ph	0,08

b) Ferro-manganèses

Ferro-manganèse à 42 0/0		*Ferro-manganèse à 83 0/0*	
Mn	42,10 0/0	Mn	83,40 0/0
Fe.	51,80	Fe.	9,50
Si.	0,90	Si.	0,80
Ph	0,35	Ph	0,25
C dit combiné.	4,80	C dit combiné.	6,50
Traces d'autres corps		Traces d'autres corps.	

B. — *Ferro-silicium et Ferro-manganèse silicium.* — Nous nous bornerons à quelques types :

Ferro-silicium à 10 0 0		*Ferro-silicium à 8 0 0*	
Si.	9,80 0 0	Si	7,83 0/0
C dit combiné.	0,69	C dit combiné.	0,38
Graphite . .	1,12	Graphite . .	1,48
Ph	0,21	Ph	0,29
Mn	1,95	Mn	1,36
S.	0,04	S.	0,03
Le reste en fer.		Le reste en fer.	

Ferro-manganèse silicium pauvre		*Ferro-manganèse silicium riche*	
Si.	5,45 0 0	Si.	10,20 0 0
Mn	13,00	Mn	20,50
C dit combiné.	2,30	C dit combiné.	2,65
Ph	0,145	Ph	0,185
Fer	79,00	Fer	66,75

C. — *Ferro-chrome.* — Les types de ferro-chromes sont aussi éminemment variables.

Nous avons déjà donné antérieurement quelques exemples de composition de ces fontes spéciales, dans le tableau qui fait suite à leur définition.

D. — *Fontes nickelifères.* — Nous avons signalé l'ancienne fabrication des fontes nickelifères au haut-fourneau et indiqué les motifs pour lesquels on avait dû y renoncer. La fonte produite avait à peu près la composition suivante :

C.	1,5 à 2	0/0
Si	2 à 3	0/0
S.	0,5 à 0,05	0/0
Ni	70 à 75	0/0
Fe	20 à 25	0/0

Les scories obtenues n'étant pas assez calcaires, le soufre du coke

t le silicium des gangues passaient en grande partie dans le métal. ,'affinage auquel on soumettait la fonte éliminait Si, mais laissait le oufre en oxydant le nickel.

Article 3. — Les fontes au bois

Dans les hauts-fourneaux au charbon de bois, la hauteur est généralement faible, dans beaucoup de fourneaux anciens elle est inférieure ı 10 mètres et descend parfois jusqu'à 6.

Dans les pays où la fabrication des fontes au bois est importante, :omme en *Suède*, en *Styrie*, les hauts-fourneaux de construction récente ınt des hauteurs supérieures à 10 mètres s'approchant en général de .2 ou 15 mètres.

L'emploi des fontes au bois devenant de plus en plus rare, il n'y a ıas lieu de s'étonner que les progrès dans l'organisation de ces appa-eils soient peu appréciables.

Le charbon de bois est friable et s'écrase sous une charge relativenent faible. Il faut, si l'on veut obtenir le maximum de dureté, le préıarer vers 350° ou 400° et par calcination lente.

La pureté de ce combustible est extrême ; aussi la fabrication de la onte au bois ne s'est-elle guère conservée, en dehors des pays de orêts comme la *Suède*, l'*Oural*, la *Bohême*, la *Styrie*, le *Michigan* et la égion du lac *Champlain*, que pour la fabrication des fontes fines destiıées à la fabrication de fers ou d'aciers de choix.

On fabrique encore, dans les *Landes*, de la fonte au bois à l'air froid avec une économie relative de combustible.

Le charbon de bois tient en moyenne 3 à 4 0/0 de cendres qui se composent d'une partie soluble (carbonate de potasse) et d'un résidu insoluble formé de carbonate de chaux et de magnésie, d'oxydes de fer et de manganèse et de silice.

Le phosphore et le soufre n'existent qu'à l'état de traces insignifiantes.

L'effet utile des combustibles dans le haut-fourneau dépend bien moins de leur pouvoir calorifique que d'un ensemble de circonstances qui modifient, suivant leur nature et leur composition, la manière dont ils se comportent en présence du minerai et du courant gazeux.

A ce point de vue, le charbon de bois a sur les autres combustibles un avantage marqué. Cela tient à la forte proportion de CO^2 qui se produit dans les hauts-fourneaux au bois.

Aux températures élevées de l'ouvrage des hauts-fourneaux modernes au coke, CO^2 ne peut subsister qu'en proportion très faible en présence du combustible incandescent. Le charbon de bois jouit de la propriété spéciale de perdre une partie de sa tendance à être attaqué par CO^2 lorsqu'il subit une exposition prolongée aux températures modérées du gueulard. Il en résulte qu'au voisinage des tuyères CO^2 peut exister en proportion notable dans le courant gazeux.

Cette forte proportion persiste dans les zones supérieures et le rapport en poids des deux gaz est, en moyenne, de 0,85 au gueulard contre 0,70 dans le cas du combustible minéral.

Dans les hauts-fourneaux au bois, il subsiste dans les zones chaudes une proportion de CO^2 qui ne peut augmenter notablement au voisinage du gueulard; la combustion ne commencera donc d'une manière active que dans la partie inférieure de l'appareil.

On trouve dans les laitiers des fontes au bois 2 à 4 0/0 d'alcalis; ces alcalis proviennent des cendres et jouent le rôle de fondants et de bases énergiques, ils permettent de marcher avec des laitiers très siliceux.

La théorie générale des laitiers exposée plus haut subsiste pour les fontes au bois à quelques différences près que nous ne saurions signaler, ce sujet présentant aujourd'hui un intérêt bien amoindri depuis la vulgarisation de l'emploi du coke dans les hauts-fourneaux de la plus grande partie des usines à fonte.

CHAPITRE III

ORGANISATION DU HAUT-FOURNEAU ET DE SES ACCESSOIRES (1)

Ce chapitre traitera surtout de la partie pratique concernant le haut-fourneau et les divers appareils qui lui sont associés : nous avons voulu, vu son objet un peu spécial, le séparer nettement des deux précédents.

(1) *Bibliographie :* Consulter pour plus de détails sur ce chapitre si important les ouvrages ci-après traitant ce sujet :

Métallurgie de la fonte, U. Le Verrier.
Fabrication de la fonte, E. de Billy.
Construction et conduite des hauts-fourneaux, de Vathaire.

ne il n'était pas possible, d'autre part, d'exposer la théorie du fourneau sans donner un aperçu général préliminaire sur cette ıisation pratique, nous avons dû consentir à quelques redites de l'importance du reste.

Article 1er. — Construction du haut-fourneau

; dilatations causées par la chaleur excessive développée dans le fourneau produisent dans sa maçonnerie d'énormes poussées.
mporte (*et l'expérience l'a confirmé*), pour éviter les fissures et les :ations, que cet appareil métallurgique soit constitué de parties ıendantes pouvant jouer les unes par rapport aux autres et que ırfaces extérieures affectent des formes géométriques déterminées ; :n se réservant néanmoins l'emploi judicieux de moyens mécani- de consolidation utilisés d'une façon permanente.

I. — *La cuve.*

cuve a, le plus souvent, deux enveloppes : une paroi réfractaire st la *cuve* proprement dite et une enveloppe extérieure qu'on ap- la *chemise.*
ntervalle de dix centimètres environ existant entre la cuve et la ise est quelquefois rempli de coke ou de fragments de briques.
remplissage a pour but de transmettre régulièrement la pression ctérieur, sans s'opposer toutefois à la dilatation.
l'intervalle est libre, on augmente un peu l'épaisseur de la cuve ; ırant d'air passant dans l'intervalle ne servant plus qu'à la rafraî- légèrement en prévenant sa désagrégation trop rapide sous l'action chaleur. La chemise d'épaisseur plus réduite n'a d'autre but, dans s, que d'abriter la cuve contre les actions extérieures.

— *Cuve proprement dite.* — La cuve est en briques très réfrac- ; fortement alumineuses pour résister à la corrosion des laitiers, ı 80 cm. d'épaisseur dans le bas, 60 au ventre, 40 au gueulard : ıombres sont approximatifs, bien entendu.
s briques employées pour sa construction ne ressemblent en rien eurs formes aux briques ordinaires ; elles sont façonnées dans un

moule spécial pour chaque fourneau et leur épaisseur est celle de la cuve elle-même.

Certains constructeurs de hauts-fourneaux paraissent cependant avoir renoncé à ce dressage si soigné ; l'emploi de petits matériaux et de joints moins finis semble devoir s'introduire peu à peu dans la pratique.

Les anciens hauts-fourneaux avaient des épaisseurs de cuve exagérées (2 mètres dans le bas), afin d'éviter les pertes de chaleur. La perte de chaleur était certainement moindre ; mais, en revanche, la concentration d'une si grande quantité de calorique favorisait la corrosion.

B. — *La chemise.* — La chemise est constituée par des briques ordinaires dont elle a l'épaisseur, elle doit être légère et dégagée.

Contrairement à ce que l'on faisait autrefois, son épaisseur sera relativement faible. On ne peut, en effet, quelle que soit l'épaisseur, éviter les pertes de chaleur; en exagérant cette épaisseur on ne fait que les pallier, tout en facilitant, comme on l'a dit, les corrosions internes.

Il vaut mieux se résoudre à cette perte et conserver les parois, grâce à ce refroidissement salutaire.

Quant à la dilatation, l'épaisseur exagérée ne l'empêche pas ; il faut lui permettre de s'exercer sans que son action soit trop nuisible.

C'est à la légèreté de la construction qu'on a recours dans ce but.

Fig. 20.

C, Chemise. — *D*, Cuve proprement dite. — *M*. Matériaux réfractaire.

La chemise est tronconique d'ordinaire, armée de frettes horizontales reposant sur des briques en saillie et fermées par des pièces rapportées pressant sur des feuilles de plomb pour faciliter la dilatation. Ces frettes sont souvent reliées par des fers placés suivant les génératrices; on a alors le frettage en *crinoline*.

Dans les hauts-fourneaux en *tour ronde*, la forme extérieure de la cuve est cylindrique ; dans ce cas, la chemise est environnée d'un revêtement complet en tôle de fer.

C. — *Cuve sans chemise.* — Les hauts-fourneaux du type Buttgenbach n'ont pas de chemise ; la cuve est directement cerclée.

Malgré les pertes de chaleur et les fissures qu'occasionnent les variations calorifiques et les influences climatériques, il ne paraît pas dé-

que la durée de ces hauts-fourneaux soit diminuée. En tous cas, facilement réparables puisque leurs fissures sont visibles.

ngleterre et aux Etats-Unis, on les a souvent recouverts d'un indage en tôle pour les rendre moins vulnérables aux variations ıres.

auts-fourneaux, d'une construction légère et économique, paraisnner de bons résultats.

II. — *Supports de la cuve et de la chemise.*

ıve est presque toujours bâtie sur des supports isolés laissant libre la partie inférieure du haut-fourneau.

. — Support primitif voûtes massives.
E, Etalages.

On ne trouve plus guère aujourd'hui de hauts-fourneaux entourés comme ils l'étaient autrefois d'épais massifs de maçonnerie.

La nécessité de refroidir le garnissage réfractaire des étalages et du creuset afin de les conserver a conduit à en dégager les abords.

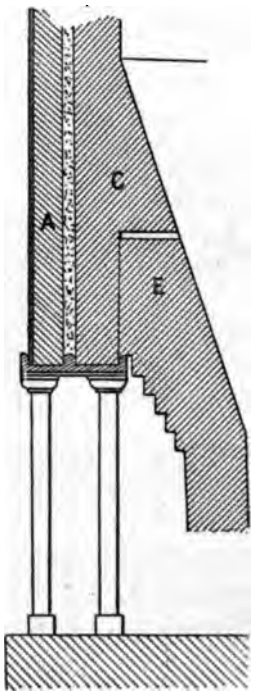


Fig. 22. — Support par colonnades doubles.
A, Chemise. — *C*, Cuve. — *E*, Etalages.

Les anciennes cuves ne de pyramide quadrangulaire étaient ıur quatre piliers massifs dits *piliers de* on y ménageait seulement une galerie faisant le tour du creuset. L'une des em- ɜs servait à la coulée, les trois autres ent des tuyères.

à peu, on dégagea les abords du haut- ıu en élargissant les embrasures du massif et en ménageant des ntre le creuset et son enveloppe. On en vint alors à supprimer

les piliers de cœur et à les remplacer par des colonnes ou supports isolés laissant libre la partie inférieure du haut-fourneau. Les supports de la cuve sont en fonte : les dispositifs employés dans leur construction varient suivant les usines.

Nous citerons les supports :

Par colonnade double ;
Par cadres ;
Par colonnade simple.

1° *Colonnade double.* — La cheminée est portée par une série de

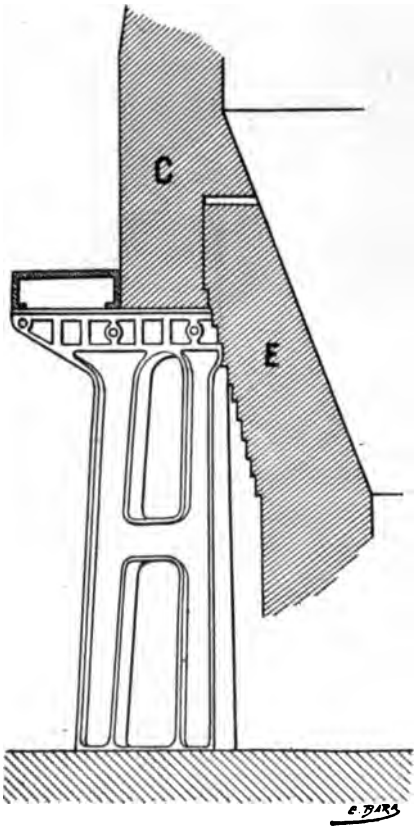


Fig. 23. — Support par cadres.
C, Cuves. — *E*, Etalages.

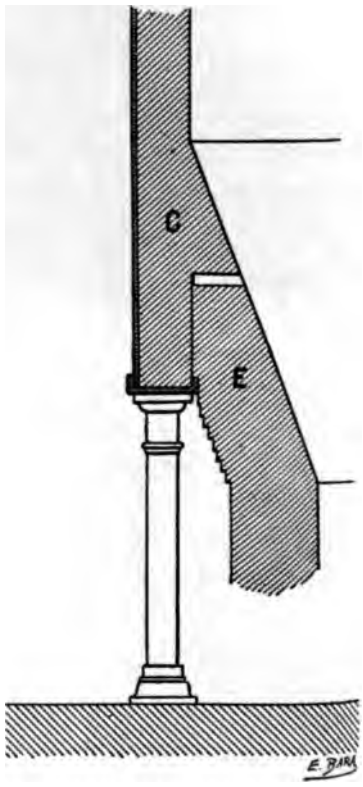


Fig. 24. — Support par colonnade simple.
C, Cuve. — *E*, Etalages.

colonnes et la cuve réfractaire par des colonnes quelquefois plus petites, espacées sur un cercle extérieur au premier.

2° *Cadres.* — Les deux cuves reposent sur une série de flasques formant des supports allongés suivant les rayons. C'est peut-être le système le plus stable ; le bas des supports doit être boulonné sur de larges semelles en fonte pour mieux répartir la pression.

3° *Colonnade simple.* —Les deux enveloppes ou la cuve quand il n'y a pas de chemise sont portées par une seule série de colonnes. C'est sur une semelle en fonte que repose la maçonnerie, cette semelle prenant appui sur le chapeau de la colonne.

Quel que soit le système employé on trouve toujours dans les hauts-fourneaux modernes les étalages et le creuset absolument dégagés sur toute leur hauteur.

III. — *Les étalages, l'ouvrage et le creuset.*

L'ouvrage et les *étalages* constituent un massif indépendant de la cuve, ils viennent s'appliquer contre elle avec un peu de jeu.

Ce jeu permet aux dilatations de s'exercer.

A. — *Etalages.* — Le raccordement des étalages et de la cuve se faisait autrefois en biseau.

La figure ci-jointe montre un des dispositifs employés aujourd'hui et donne également le détail du support par colonnade simple au cas où la cuve proprement dite est entourée d'une chemise.

Ce mode de raccordement est très pratique, car les angles qui constituent toujours des parties faibles sont ainsi évités.

Dans quelques hauts-fourneaux, les étalages sont cerclés par un revêtement en tôle accroché aux colonnes qui portent la cuve, ils sont ainsi suspendus et ne portent plus sur le creuset qui est la partie du fourneau la plus exposée à se dégrader.

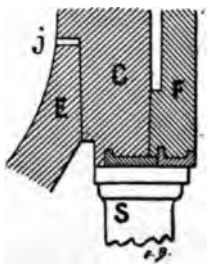


Fig 125. — Raccordement des étalages avec la cuve.

C, Cuve. — *E*, Etalages. — *F*, Chemise. — *J*, Jeu. — *S*, Support.

B. — *Ouvrage.* — L'ouvrage présente au-dessus du niveau des laitiers une série d'orifices coniques pour placer les buses ou busillons qui amènent le vent.

La buse, sorte d'ajutage étroit de 0m20 à 0m22 de diamètre est fixée au bout du tuyau porte-vent.

Le tuyau porte-vent muni de sa buse pénètre horizontalement par l'orifice pratiqué dans l'ouvrage; mais cet orifice n'est pas pratiqué à même dans la maçonnerie, il est garni et maintenu par des cônes métalliques appelés tuyères.

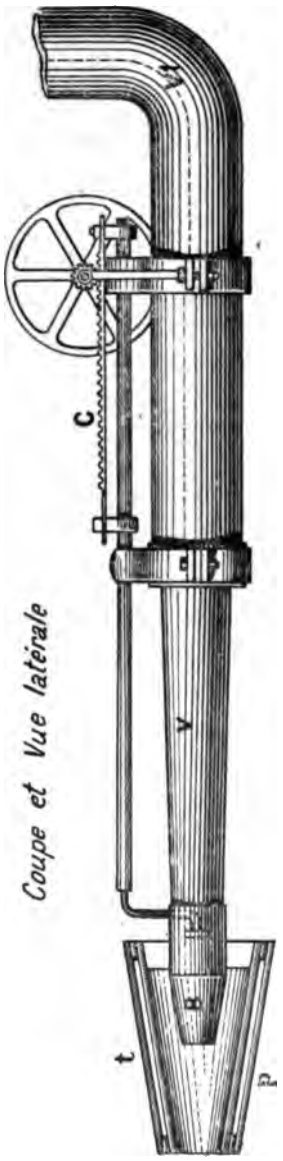


Fig. 26. — Tuyère et porte-vent. — Coupe et vue latérale.

B, Buse. — *t*, Tuyère. — *p*, Paroi creuse. — *C*, Crémaillère. — *V*, Porte-vent. — V_1, Coude du porte-vent.

L'autre extrémité du tuyau porte-vent se redresse verticalement pour venir se brancher sur la conduite de vent entourant le haut-fourneau.

Les tuyères sont des organes établis à l'intérieur d'embrasures ménagées dans la maçonnerie de l'ouvrage et d'une grande importance puisqu'elles servent à recevoir et à protéger les buses ou busillons terminant les conduites de vent chaud.

Pour assurer la conservation des tuyères, on les refroidit par un courant d'eau qui rafraîchit en même temps la maçonnerie environnante.

Les tuyères sont à *serpentins* ou à *parois creuses*.

Les tuyères *anglaises* sont en fonte moulée dans l'épaisseur de laquelle on a introduit avant la coulée un serpentin en fer forgé.

C'est dans ce serpentin en fer forgé qu'on fera circuler l'eau qui doit refroidir la tuyère.

On fait aussi des tuyères constituées par un unique serpentin en fer dont les spires ont été rapprochées jusqu'au contact.

Les tuyères à serpentin ne sont pas d'un emploi très pratique, car elles finissent par s'obstruer si les eaux de refroidissement sont incrustantes.

Quant aux tuyères à spires jointives, elles se couvrent le plus souvent de garnissages adhérant très fortement à leur surface tourmentée. On éprouve alors, de ce fait, de grandes difficultés quand on veut les enlever.

Les tuyères à parois creuses ont été faites d'abord en tôle soudée, puis en fonte; elles se brûlent, résistent mal et l'eau arrive en trop grande quantité dans l'ouvrage quand elles se percent, ce qui peut occasionner de très graves accidents.

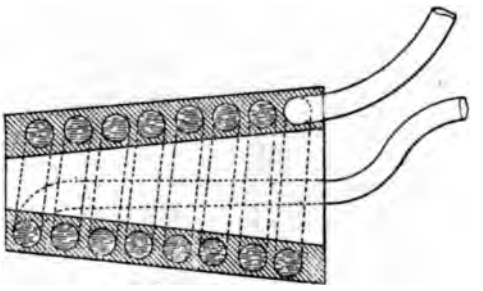


Fig. 27. — Tuyère en fonte avec serpentin en fer.

Le bronze qui n'adhère pas à la fonte liquide a donné de meilleurs résultats : le cuivre rouge a le même avantage et il est plus régulier de composition. Le seul inconvénient de ces tuyères est que, construites en de tels métaux, elles coûtent beaucoup plus cher. On peut objecter, il est vrai, qu'elles se conservent beaucoup plus longtemps; une tuyère bien faite pouvant durer un an.

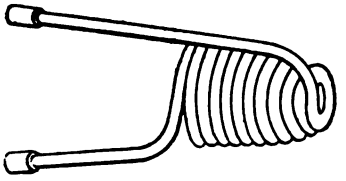


Fig. 28. — Tuyère en fer forgé.

Leur extraction est toujours facile.

Le bronze de qualité moins régulière que le cuivre se refond plus aisément et perd moins de valeur quand la tuyère est mise hors de service.

Malgré cela, on préfère souvent les tuyères en cuivre. Ces tuyères sont obtenues par emboutissage de feuilles de cuivre donnant des viroles annulaires et ne présentant pas plus de 15 à 20 mm. d'épaisseur après finissage.

Elles sont aussi énergiquement refroidies et durent longtemps, mais elles ne peuvent se réparer et n'ont plus aucune valeur quand elles sont hors d'usage.

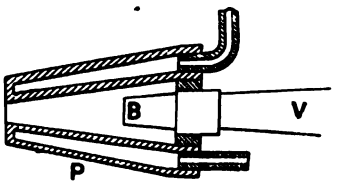


Fig. 29. — Tuyère en bronze.
B, Buse. — *P*, Paroi creuse. — *V*, Porte-vent.

Elles sont constituées en deux pièces séparées, l'anneau et le cône, assemblées par une brasure. Cette disposition, qu'on peut appliquer à toutes les parois creuses est avantageuse lorsque les eaux sont incrustantes, elle permet de nettoyer l'intérieur.

L'eau fraîche est amenée dans les tuyères creuses par un tuyau qui doit pénétrer jusqu'à l'extrémité ou au moins le plus près possible du fond de l'anneau, l'évacuation devant se faire par le point le plus haut

afin que les bulles d'air ou de vapeur ne puissent séjourner contre les parois. Ces tuyères exposées à l'action corrosive des laitiers ne résistent que grâce à une circulation d'eau active et complète.

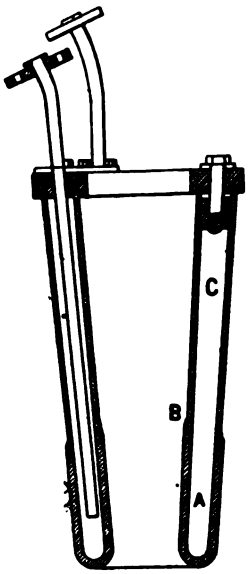


Fig. 30. — Tuyère en cuivre.

A, Anneau. — *B*, Brasure. — *C*, Cône.

Les tuyères doivent avoir leurs axes rigoureusement horizontaux et disposés sur le même niveau; elles sont placées normalement au profil horizontal interne de l'ouvrage.

Elles sont généralement au nombre de 5; dans les hauts-fourneaux à anthracite où il faut activer plus énergiquement la combustion on peut en mettre de 7 à 11.

Au point de vue de l'uniformité de la température, la multiplicité des tuyères est un avantage; mais ces nombreuses embrasures compromettent la solidité des parois et pour une quantité donnée de vent, il faudra à cause des frottements une force de compression d'autant plus grande que les buses seront plus nombreuses et à section plus faible.

C. — *Creuset.* — Le creuset est la région du haut-fourneau où se rassemblent la fonte et les laitiers.

On distingue, au point de vue de l'organisation du creuset, les hauts-fourneaux à *poitrine ouverte* et ceux à *poitrine fermée :*

1° *Poitrine ouverte.* — Dans les fourneaux à poitrine ouverte employés surtout autrefois, le creuset se prolongeait à l'extérieur par une sorte de bassin appelé *avant-creuset.* La face antérieure de l'avant-creuset s'appelle

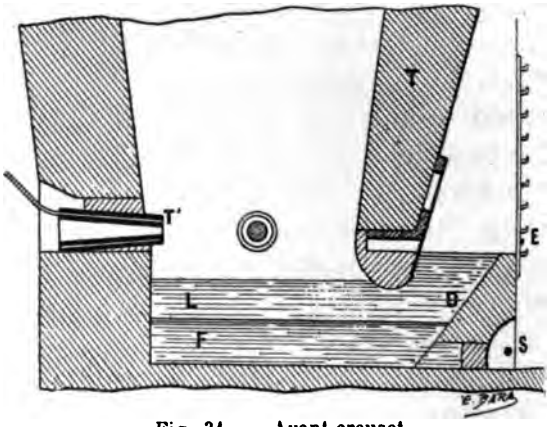


Fig. 31. — Avant-creuset.

T, Tympe. — *E*, Echappement des laitiers. — *T'*, Tuyère. — *L*, Laitiers. — *F*, Fonte. — *D*, Dame. — *S*, Sortie de la fonte.

dame, elle est soutenue par une plaque de fonte. Quand le creuset est plein de fonte, on la fait écouler en perçant le trou de coulée ménagé à sa partie inférieure. Ce trou est ensuite rebouché avec de l'argile. Il faut arrêter la soufflerie pendant l'opération.

Lorsque l'écoulement naturel des laitiers par-dessus la dame est rendu difficile à cause de leur trop grande viscosité, on peut les retirer au moyen de ringards et de crochets.

La poitrine ouverte est sujette à des détériorations assez fréquentes, elle est une cause de complications dans la marche de l'appareil et provoque, en outre, un refroidissement assez sensible aggravé par l'arrêt de la soufflerie pendant le travail ou la coulée. Elle était cependant nécessaire, à l'époque où l'air n'étant chauffé qu'à une faible température, il se produisait facilement des engorgements de laitiers réfractaires, exigeant un travail dans le creuset.

Les fourneaux dont le creuset était entièrement fermé constituaient l'exception et se rencontraient surtout en Styrie où la marche au charbon de bois, jointe à la grande fusibilité des minerais, mettait à l'abri de semblables accidents.

Le chauffage de l'air à l'aide des appareils à air chaud a rendu les engorgements beaucoup moins à craindre.

2° *Poitrine fermée.* — On a donc cherché à fermer entièrement le creuset en marchant à poitrine fermée ; on s'est contenté de ménager une ouverture spéciale pour l'écoulement des laitiers.

Pour empêcher les laitiers d'agrandir par la corrosion de la maçonnerie l'orifice par lequel ils s'échappent, on a eu l'idée de pratiquer cet orifice dans une plaque refroidie.

Le meilleur dispositif a été présenté par M. l'Ingénieur Luermann qui a donné à son appareil le nom de tuyère à laitier.

Cette tuyère en bronze et à courant d'eau est fixée, pour assurer l'invariabilité de sa position, dans une caisse en fonte à parois refroidies par un serpentin noyé dans la masse.

Cette caisse elle-même est placée dans une grande embrasure garnie d'un cadre en fonte avec serpentin ; elle y est maintenue au moyen d'un bourrage en terre réfractaire bien facile à percer en cas d'engorgement de la tuyère elle-même.

Le centre de l'ouverture doit être à 0 m. 30 ou 0 m. 50 au-dessous des tuyères soufflantes. Cette tuyère doit s'enfoncer un peu plus loin que la face intérieure de la maçonnerie, sans quoi celle-ci serait rongée tout autour :

Quand les laitiers sont bas (*après la coulée*), on bouche la tuyère avec de l'argile. Il faut la surveiller pour la déboucher dès que les laitiers s'y montrent : il est important en effet d'éviter qu'ils ne puissent s'élever jusqu'aux tuyères soufflantes. Dans son étude sur les progrès récents de la métallurgie du fer, M. l'Ingénieur de Billy signale, d'après l'*Iron Age* du 21 novembre 1895, un appareil pour la fermeture du trou de coulée de la fonte, permettant de couler sans arrêter le vent. Cet appareil d'un emploi commode et sûr se compose d'un cylindre à piston hydraulique porté par une petite grue pivotante : à la fin de la coulée et sans arrêter le vent, l'ouvrier peut rabattre contre l'orifice le cylindre où l'on a préalablement logé un tampon en terre réfractaire et le piston chasse cette bourre dans le trou de coulée avec une force et une vitesse réglables à volonté.

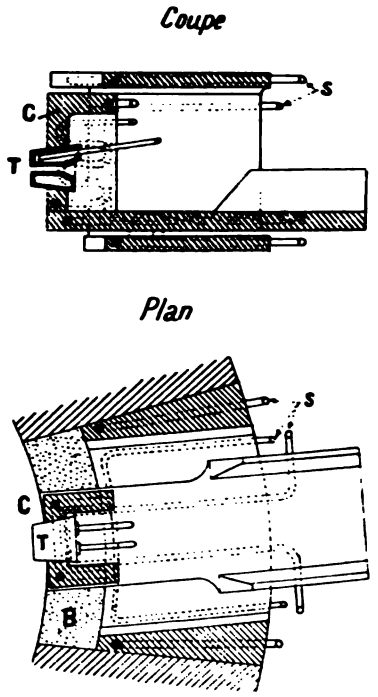


Fig. 32.

B, Bourrage en terre réfractaire. — *C*, Caisse en fonte. — *T*, Tuyère en bronze. — *S*, Serpentins de refroidissement.

Le fond du creuset doit être construit avec un soin tout particulier; il faut s'opposer, en effet, aux infiltrations de la fonte qui tendent à le soulever et à le détruire. La maçonnerie réfractaire de la sole est séparée de celle des fondations du fourneau par un lit de sable, laitiers, déchets, etc... La profondeur du creuset comptée à partir de l'axe des tuyères jusqu'au trou de coulée de la fonte varie entre un et deux mètres.

IV. — *Refroidissement des parois.*

Les laitiers ferreux, manganésés, etc... rongent les étalages et les parois du creuset et les réduisent souvent à une épaisseur trop faible pour résister à la charge qu'ils supportent.

Quelquefois ils affouillent la sole elle-même et compromettent les

fondations du fourneau. Par elles-mêmes les briques ne sauraient résister à ces actions corrosives, mais s'il peut se former des garnissages, les parois se trouvent protégées. Ces garnissages, formés surtout en allure chaude et ultra-calcaire, sont constitués par des matières charbonneuses associées à SiO^3, Al^2O^3, CaO, MgO, etc..., ils subsistent en épaisseur suffisante tant que le laitier est basique, mais s'il devient siliceux, ils fondent plus facilement et la paroi est rongée.

Le seul moyen efficace pour favoriser la formation des garnissages et arrêter le progrès des corrosions *est le refroidissement.*

Or, on peut se contenter de faire ruisseler de l'eau froide le long des étalages quand l'allure n'est pas très chaude : ce moyen devient insuffisant quand on marche en certaines fontes telles que Fe-Mn, Fe-Si, Fe-Mn-Si, etc...

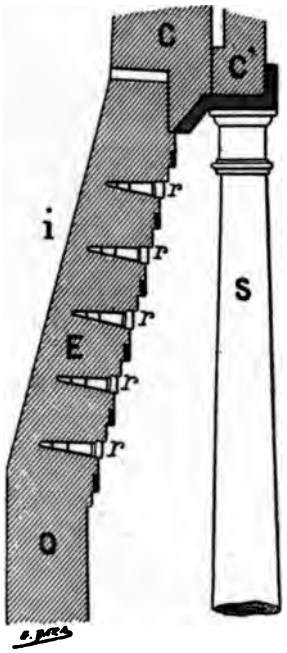


Fig. 33 — Refroidisseurs ajustés dans les étalages.

C, Cuve. — *C'*, Cheminée. — *O*, Ouvrage. — *E*, Etalages. — *i*, Intérieur du haut-fourneau. — *rrrrr*, Refroidisseurs. — *S*, Support.

On a alors logé dans la paroi 5 à 6 rangées de refroidisseurs en fonte à circulation d'eau. La paroi du creuset a été entourée d'un blindage composé de plaques appelées *tympes*, formées de serpentins noyés dans la fonte.

On peut aussi adopter le système des bâches à eau à circulation libre ou forcée. Ces bâches sont placées dans une série d'embrasures et protégées vers l'intérieur par une faible épaisseur de terre réfractaire.

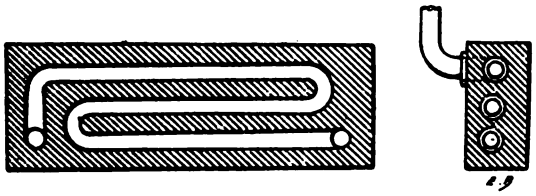


Fig. 34. — Tympe à eau.

Quelquefois on recouvre la paroi de plaques de tôle qu'on arrose et sur lesquelles l'eau circule en suivant des rigoles disposées en hélice. Ce système donne un refroidissement bien régulier, facile à activer à volonté.

Enfin, autour de la maçonnerie, une rigole profonde de 0m50 à 0m60 au-dessous du fond du creuset et toujours pleine d'eau est destinée à empêcher la sole de s'affouiller.

L'épaisseur des fondations doit être au moins de 3 mètres, leur base étant constituée par un radier de béton.

Le système de l'arrosage, soit direct, soit par les refroidisseurs, ne donne pas la solution complète du problème. On a voulu tenter l'emploi d'un revêtement charbonneux pour le creuset et les étalages, résistant seul à l'action de la fonte et des laitiers liquides.

De là, l'emploi des briques de graphite et d'argile ou de coke associé à l'argile et au goudron. La pâte de ces briques est liée avec un mélange d'argile et de poussier de coke humecté convenablement. Ces briques de graphite résistent bien aux corrosions pourvu qu'elles soient bien arrosées et que les laitiers ne soient pas chargés d'oxydes de fer. Dans ce dernier cas, le graphite ne résiste pas à cause de la réduction qu'il opère sur ces oxydes.

Inauguré aux usines de *Terrenoire* lorsqu'on cherchait à y fabriquer les fontes spéciales riches en manganèse ou en silicium, l'emploi des briques graphiteuses n'a pas tardé à se répandre en *France* et à l'étranger, surtout en *Amérique*. Dans son étude plusieurs fois citée sur les progrès de la métallurgie du fer, M. de *Billy* signale, d'après l'*Engineering Review* de mars 1896, un exemple très caractéristique du bon usage d'un revêtement graphiteux. Un haut-fourneau construit à *Donawitz* avec une paroi graphiteuse au creuset (*épaisseur :* 1 mètre, *composition :* trois parties de graphite pour une partie d'argile) a fourni une campagne de cinq années après avoir donné annuellement 55,000 tonnes de fonte. La paroi en graphite réduite à une épaisseur de 0m70 peut, sans réparations, supporter une nouvelle campagne.

Enfin, on a cherché à supprimer l'inconvénient que présente toute maçonnerie d'être peu conductrice en la remplaçant par une paroi métallique. Suffisamment solide pour résister aux charges qu'elle a à supporter, cette paroi est assez conductrice pour qu'un arrosage énergique assure la formation d'une épaisseur suffisante de garnissages.

La paroi métallique est constituée par du fer ou plus généralement par de l'acier doux.

V. — *Des creusets en fer.*

Ces creusets en fer consistent souvent en fragments d'acier dont la forme ressemble à celle des briques ordinaires et assemblés comme elles par assises superposées et joints alternés. Ils résistent très bien à l'action des laitiers, mais la fonte s'infiltre dans les joints et les disloque.

Les perçages sont alors à craindre malgré les frettes dont on aura entouré le creuset. Il semble donc que la question importante dans la construction d'un creuset en fer, soit de veiller à ce que les infiltrations de la fonte ne soient pas possibles à travers les joints de l'assemblage.

Des creusets en fer très bien organisés sont aujourd'hui installés dans un assez grand nombre d'usines, à Denain, à Chasse, à Firminy, etc...

Nous examinerons, avec quelques développements, la construction du creuset en fer des usines de Firminy dont les dispositions si originales et si efficaces sont dues au regretté M. Boivin (1), resté longtemps Ingénieur du haut-fourneau et du puddlage.

C'est dans un mémoire paru dans les *Comptes-rendus de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne* que M. Boivin expose les principes qui l'ont guidé dans la construction de son creuset.

A. — *Les briques n'étant presque pas conductrices, la corrosion n'est pas limitée.*

Il nous semble nécessaire, avant de procéder à l'étude de détail, d'exposer les considérations générales de cet habile Ingénieur au sujet de la conservation des creusets des hauts-fourneaux.

La non conductibilité pour la chaleur des briques siliceuses, alumineuses et graphiteuses fait que l'action corrosive des laitiers de nature fort variée produit son effet jusqu'à ce que l'épaisseur du revêtement soit telle qu'il y ait équilibre entre la quantité de chaleur qui lui est communiquée par l'intérieur dans un temps t et la quantité de chaleur

(1) M. l'ingénieur Boivin, récemment décédé, est l'auteur d'un grand nombre de progrès caractéristiques dans la conduite du haut-fourneau et du cubilot Rollet. Nous devons, pour notre part, à cet ingénieur et à ce chimiste distingué, qui a été notre ami, une grande part de reconnaissance pour nous avoir si souvent dirigé et guidé dans nos études métallurgiques. L. G.

que cette épaisseur peut transmettre dans le même temps à l'eau d'arrosage. On peut appeler cette épaisseur : *épaisseur d'équilibre*.

Or, avec des briques, l'épaisseur d'équilibre ne peut être atteinte et le creuset cède à l'effet hydrostatique au bout d'une durée de marche plus ou moins longue.

B. — *Avec un creuset métallique, la corrosion est très vite limitée.* Pour faire cesser les perçages, il faut donc s'efforcer d'augmenter *l'épaisseur d'équilibre* et, pour y arriver, employer des matériaux conducteurs.

Or, le refroidissement extérieur par aspersion empêche les éléments métalliques de se souder, même de rougir. Il en résulte que la matière qui emplit le joint des éléments métalliques ne peut point y fondre pour lier les éléments et devient pulvérulente.

Au bout d'un certain temps ces joints, surtout les joints verticaux qui donnent plus de prise au travail du ruissellement, finissent par se vider.

Les choses restent en cet état tant que le garnissage que le revêtement a formé par son action glaçante sur les matières fondues ne se lézarde pas, mais si une fente se produit, ces matières commencent à s'écouler au dehors. L'eau du refroidissement entre en caléfaction en cette région, l'épaisseur d'équilibre se détruit, l'eau n'accomplissant plus son action refroidissante. Un perçage peut arriver comme conséquence de l'agrandissement du joint par fusion locale, à moins qu'on ne réussisse à faire la coulée immédiatement. Dans tous les cas, une réparation urgente s'impose.

Il en résulte que le *joint* est la partie essentielle dans un creuset métallique.

C. — *Description du creuset.* — L'acier moulé et recuit a été choisi comme matière conductrice. Les éléments composant l'appareillage sont aussi grands que possible pour diminuer le nombre des joints. Ils comprennent :

a) Les voussoirs formant cinq assises ; chaque voussoir a 1 mètre de largeur, 48 centimètres de hauteur et 15 centimètres d'épaisseur.

Ils sont munis de deux oreilles destinées à faciliter leur manœuvre, sont assemblés par des frettes en fer dur et ne se touchent que par l'intérieur.

'espace qu'ils laissent entre eux est bourré de terre maigre, puis tresse d'amiante préalablement aplatie est introduite et relevée à s contre la terre : derrière cette tresse on place de petits fers à T s'appuient exactement sur la tresse, la cote en dehors.
ette cote est coupée en biseau vers les extrémités du fer qui viennent

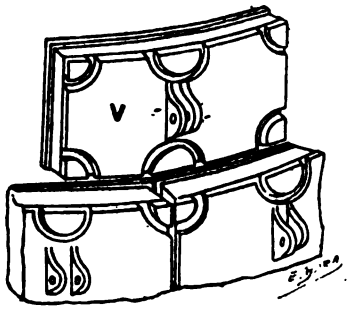


Fig. 35. — Assemblage des voussoirs.
V. Voussoir en acier moulé.

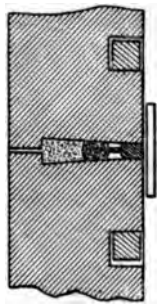


Fig. 36. — Détails du joint.

ıérer sous les frettes. Enfin, des calages en fer sont disposés entre ɔortées de frettage pour permettre aux frettes de serrer sans déran- la position des voussoirs. Le tout forme alors une tourelle étanche.

ı **Les gendarmes** (droite et gauche) qui sont x pièces verticales en acier moulé, s'assemblant voussoirs voisins, reliant les extrémités de es les assises et encadrant la coulée sur toute la teur du creuset.

'espacement des gendarmes est de 70 centi- res.

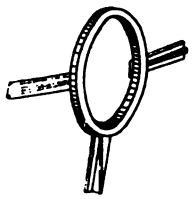


Fig. 37. — Insertion des fers à *T* sous les frettes.

ette fente de 70 centimètres, bourrée en maté- x réfractaires, est destinée à laisser suivre au ı de coulée les mouvements de montée ou de descente de la sole.

ı **Un voussoir spécial** qui occupe l'emplacement de la tuyère à laitiers. n remarque que le revêtement métallique se prolonge bien au-des- ; du niveau de la sole ; cette disposition est prise dans le but d'em- ıer la fonte de s'étendre en largeur au cas où la sole se creuserait. ıt clair qu'il faudra que le refroidissement du creuset soit efficace oute sa hauteur.

Le creuset du haut-fourneau de Firminy allumé le 20 novembre 1891.

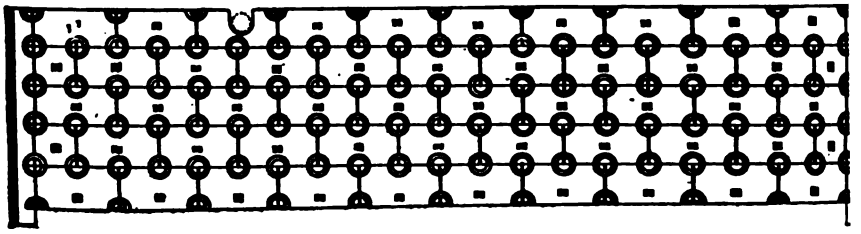


Fig. 38. — Développement de l'appareillage.

a fort bien résisté pendant une campagne de cinq années malgré des marches exagérées à dessein et des fabrications de fonte très variées

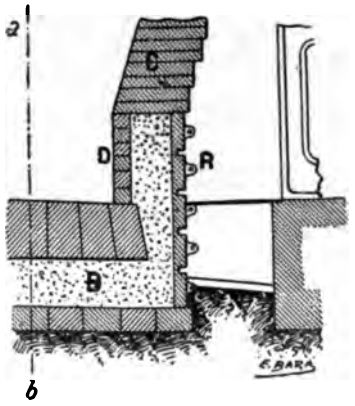


Fig 39. — Creuset en acier doux.

a b, Axe du haut-fourneau — *B*, Brasque. — *C*, Maçonnerie réfractaire. — *D*, Matériaux réfractaires. — *R*, Revêtement métallique.

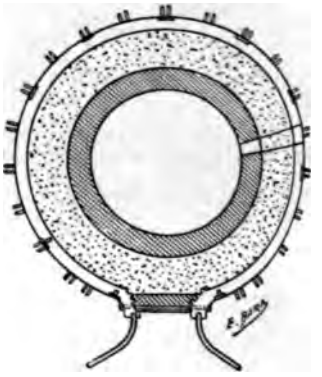


Fig. 40. — Coupe horizontale du creuset.

Ce creuset, dont le bon fonctionnement a reçu du reste la sanction expérimentale, peut être regardé à bon droit comme un des meilleurs types de creusets métalliques.

VI. — *Examen critique des diverses dimensions des hauts-fourneaux.*

Dans l'étude du profil d'un haut-fourneau, il y aura à réaliser un volume donné tout en déterminant les diverses dimensions de manière

la descente des charges puisse s'y faire facilement et que la réduc-
s'accomplisse le mieux possible.

.. — *Hauteur.* — Elle est limitée par la résistance des matériaux qui
ıposent le lit de fusion. De plus, la hauteur doit être en rapport avec
ıression du vent et cette dernière est d'autant plus forte que le com-
tible est plus dur et plus difficile à brûler.
Tous avons donné antérieurement les hauteurs généralement adop-
: dans la pratique pour les hauts-fourneaux marchant au coke ou
charbon de bois.
En général, l'expérience n'a pas été favorable aux hauteurs exagérées
à 30 mètres), sauf toutefois pour les hauts-fourneaux à l'anthracite
ı condition d'avoir des pressions de vent considérables.

). — *Diamètre de l'ouvrage.* — Le diamètre de l'ouvrage est fonc-
ı de la température à réaliser ; plus celle-ci est forte, plus il devraêtre,
ıle.
Dans les hauts-fourneaux au coke, l'ouvrage a un diamètrevariant
2 mètres à $2^{m}50$; on n'a jamais dépassé 4 mètres.
Pour les fontes grises il vaudra mieux se tenir au-dessous de 2 m.
ıe rapprocher de $1^{m}50$.
On emploie cependant dans certains pays des creusets de plus de
nètres de diamètre sans qu'on ait trop à s'en plaindre : il y a lieu de
ıarquer dans ce cas que le nombre des tuyères a été très augmenté
atteint 11 quelquefois) et que la pression du vent est de $0^{m}40$ ou $0^{m}50$.
En fait, le diamètre au creuset est déterminé par la limite pratique
la pression du vent qui doit être assez forte pour faire pénétrer la
ıe chaude jusqu'au centre du fourneau.

C. — *Diamètre du gueulard.* — Le gueulard doit être assez étroit
ur qu'on puisse bien répartir la charge sur toute la section.
Quand il n'y a pas d'appareil de chargement, ce qui est le cas des
tits hauts-fourneaux au bois, il a environ 1 mètre de diamètre ; dans
: hauts-fourneaux au bois de plus grandes dimensions il atteint deux
ètres et dans les hauts-fourneaux au coke munis d'un appareil de char-
ment il peut aller jusqu'à 4 mètres.
Il y a cependant en Amérique des hauts-fourneaux marchant très ré-
lièrement avec des gueulards très larges : cela s'explique par la forte

pression du vent, la richesse du lit de fusion, la dureté des minerais et des combustibles.

En pratique, le diamètre du haut-fourneau au gueulard est souvent limité par celui qui convient à l'appareil de chargement, soit pour la facilité de la manœuvre, soit même pour son bon fonctionnement.

D. — *Forme de la cuve.* — Le diamètre étant limité au haut et au bas du fourneau, on est amené pour augmenter le volume à élargir le fourneau au centre, soit au ventre. La largeur du ventre sera limitée de manière à ménager les raccords avec les régions supérieure et inférieure du fourneau.

Pour assurer une bonne circulation des gaz, la pente doit être raide, elle est généralement comprise entre 70 et 80 0/0. Avec des étalages plats, une zone considérable échappe à l'action des gaz et la charge descend à l'intérieur du profil qui se trace naturellement au milieu des garnissages accumulés dans l'angle plus ou moins aigu des étalages.

On a vite reconnu que le profil devait être celui qui correspondait à la descente naturelle de la charge.

Gruner classait les hauts-fourneaux en trapus, moyens ou élancés, suivant que le rapport de la hauteur au diamètre était inférieur à 3, compris entre 3 et 4, ou supérieur à 4. Seuls, les fourneaux élancés ont donné des résultats satisfaisants.

Quant à la position du ventre, la règle ancienne était de le placer au tiers de la hauteur en lui donnant le double du diamètre au gueulard; aujourd'hui on le place au quart ou même au cinquième de la hauteur, son diamètre étant supérieur d'un tiers ou d'un quart à celui du gueulard.

Tantôt on compose la cuve et les étalages de deux troncs de cône réunis par leur base, on intercale une partie cylindrique au niveau du ventre, ou bien on adopte un profil courbe donnant au fourneau une forme ovoïde.

En résumé, toutes les règles relatives au profil découlent de la nécessité de réaliser un *volume convenable* et de celle d'éviter toute dimension exagérée et tout changement de section brusque afin d'assurer la régularité de la descente des charges.

E. — *Volume du haut-fourneau.* — Qu'est-ce donc que ce *volume convenable* à réaliser? Ce sera celui pour lequel les gaz seront en con-

ıffisant avec les minerais pour opérer complètement leur réduction.
. exister un certain rapport entre le volume du fourneau et la pro-
n journalière. C'est ce rapport qu'on a appelé le *volume spécifique*
ırneau.

tes les règles posées plus haut concernaient des *déterminations*
ıes pour des fourneaux dont les hauteurs variaient entre des li-
assez étendues, elles n'avaient trait qu'au volume spécifique du
:au.

ıolume absolu V peut varier beaucoup avec la production, mais il
ırte un maximum naturel dépendant évidemment des limites que
ıvons données plus haut et qu'on ne peut dépasser sans s'exposer
mauvaise marche.

r un haut-fourneau de dimensions modérées et élancé, V = 200 à
ou 300 si les minerais sont durs. On est allé dans certains hauts-
:aux à 500, 600 et même davantage.

'on prend pour limite 250, la production journalière en fonte
ıe pourra atteindre 100 tonnes et 60 en fonte grise dans les grands
:aux. Les fourneaux moyens donneraient 40 à 50 tonnes de fonte
60 à 80 de fonte blanche.

s ces nombres ne correspondent qu'aux productions moyennes du
ent. Les Américains, vers 1880, se sont engagés dans la voie des
productions. Ils augmentèrent progressivement la quantité du
ıncé, le diamètre du creuset et le volume du fourneau jusqu'au
nt où ils purent faire passer dans un fourneau de 580^{m3} un vo-
le 730^{m3} de vent chauffé à 600°; la production put atteindre 350
ı de fonte par 24 heures, mais la consommation de coke atteignit
logrammes par tonne de métal produit.

Article 2. — Les appareils a air chaud

1828, James Beaumont Neilson, Ingénieur de l'usine à gaz de
ɔw en Ecosse, pensa qu'il pourrait être utile de chauffer l'air ve-
le la machine soufflante avant de le lancer par les tuyères dans
ieur du haut-fourneau, en utilisant pour ce chauffage la chaleur
ée dans des appareils spéciaux par la combustion d'une partie des
cueillis au gueulard.

'idée avait un *certain attrait*, nous dit M. Lowthian Bell dans

« ses « Principes de fabrication du fer et de l'acier » et fut rapidement « mise à exécution.

« Quatre ans après, les fourneaux de la *Clyde*, en Ecosse, fabriquaient « le double de leur production première sans exiger plus de combusti- « ble pour la forte production comme pour la plus petite. En d'autres « termes, la consommation par tonne de fer du combustible employé, « avec un air chauffé à 315°, fut moitié moindre que celle qui était pré- « cédemment nécessaire en faisant usage du vent chauffé à la tempé- « rature ambiante. »

Ces résultats excitèrent la plus grande surprise dans le monde scientifique ; nous avons vu dans notre étude élémentaire de la combustion comment on explique ce rendement calorifique.

I. — *Appareils en fonte.*

Les anciens appareils à air chaud comprenaient, disposée à l'intérieur d'une enceinte en maçonnerie, une canalisation en fonte dans laquelle passait l'air venant de la machine soufflante.

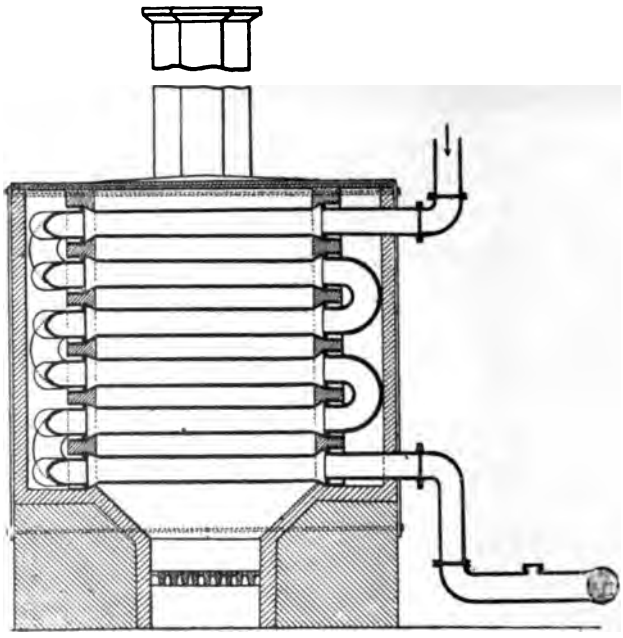


Fig. 41. — Appareil à air chaud à tuyaux en fonte.

Cette canalisation était chauffée extérieurement, soit par les flammes d'un foyer spécial, soit par la combustion même d'une partie des gaz du haut-fourneau. Dans ce dernier cas, les gaz arrivent du gueulard par un conduit qui s'épanouit en forme de biseau, de façon à fournir une mince nappe verticale de gaz frappée normalement par une série de jets d'air pénétrant dans le foyer par des orifices spéciaux. Sur la grille on entretient un faible feu de coke destiné simplement à prévenir les mélanges détonants en assurant l'inflammation des gaz combustibles.

Nous ne décrirons pas en détail ces divers types d'appareils : l'un des systèmes est un large conduit unique plusieurs fois replié à la façon d'un serpentin, l'autre consiste en une série de tuyaux peu allongés, tous ployés comme des siphons divisant l'air en 8, 10 ou 12 courants partiels.

Ces appareils sont connus, en France, sous les noms des deux usines où ils furent d'abord installés : le premier s'appelle Wasseralfingen (Würtemberg), le second s'appelle Calder (Écosse).

Le principal inconvénient de ces appareils provient de la nature même de la canalisation, car la fonte ne peut, sans danger, supporter une température supérieure à 400 ou 500°. Or, aujourd'hui avec la production intensive et spéciale des hauts-fourneaux modernes, les températures du vent soufflé doivent parfois atteindre ou dépasser 800°.

Il fallait, en outre, soigner particulièrement ces appareils au point de vue de la construction pour parer aux inconvénients dus aux dilatations du métal. Les parties courbes et les coudes devaient être placés, ainsi que les joints, à l'abri des coups de feu, etc...

Aussi, a-t-on renoncé actuellement aux systèmes de chauffage fondés sur la transmission à travers des parois métalliques pour appliquer le principe de la récupération de la chaleur dû à *Siemens*.

II. — *Appareils en briques.*

A. — *Notions générales.* — Les appareils à air chaud en briques permettent de réaliser des températures que la fonte ne supporterait pas. Ils consistent en des espèces de grandes ruches cylindriques contenant une série de cloisons en briques réfractaires. Tout cet ensemble est protégé extérieurement par une enveloppe en tôle rivetée.

Dès que l'air qu'il s'agit de chauffer possède sur l'atmosphère exté-

rieure un excès de pression de quelques millimètres de mercure, il faut renfermer l'appareil tout entier dans une sorte de tour ou enveloppe en tôle de fer capable de résister aux tensions élevées du vent.

La tour en tôle de fer est garnie à l'intérieur d'un revêtement en briques pour en protéger le métal contre l'action oxydante de l'air chaud.

Le fonctionnement de ces appareils est très simple :

Faisons arriver dans l'un de ces appareils, par une *soupape 1*, une dérivation des gaz combustibles sortant du gueulard du haut-fourneau et, par une *soupape 2* de l'air emprunté à l'atmosphère. Si l'appareil marche pour la première fois, comme les gaz venant du haut-fourneau ne sont pas assez chauds pour s'enflammer au contact de l'air naturel, on en provoquera la combustion en suspendant dans le compartiment principal de l'appareil un réchaud contenant du coke en ignition ou tout autre combustible.

Par cette combustion, on échauffera le massif intérieur de briques dont l'appareil est constitué. Les gaz brûlés parcourront des chemins plus ou moins compliqués pour gagner par une *soupape 3* la cheminée principale qui les évacuera dans l'atmosphère.

Cette combustion sera entretenue pendant un temps suffisant pour porter l'appareil à la température voulue. Cela fait, on fermera les soupapes 1, 2 et 3 à l'aide de valves manœuvrées par un système de chaînes disposées à l'extérieur.

Les gaz et l'air arrivaient dans l'appareil par les soupapes 1 et 2, voisines l'une de l'autre et disposées d'un côté de l'appareil ; on ouvrira maintenant une *soupape 4* disposée du côté opposé, voisine de la soupape 3, et donnant accès à l'air froid sous pression venant de la soufflerie. Cet air froid parcourra en sens inverse le chemin que les gaz brûlés ont parcouru pour gagner la cheminée, il s'échauffera dans son parcours et, quittant l'appareil par une *soupape 5*, gagnera des conduites qui l'amèneront par les tuyères dans l'ouvrage du haut-fourneau.

Au bout d'un certain temps, l'appareil se sera trop refroidi, il faudra fermer les soupapes 4 et 5 et le réchauffer à nouveau en ouvrant les soupapes 1, 2 et 3, avec cette différence, toutefois, qu'on n'aura plus besoin cette fois de provoquer la combustion à l'aide d'un foyer auxiliaire, puisqu'il restera assez de chaleur aux briques pour enflammer de suite le mélange d'air et de gaz combustibles.

Il faut au moins deux appareils identiques : l'un marche au refroi-

t au vent, pendant que l'autre marche au chauffage, soit

briques perdent plus rapidement leur chaleur au contact
:s ne s'échauffent au contact des gaz enflammés, il faut,
nployer deux appareils à air chaud : deux marchent au
ue le 3e marche au vent.
, on pourra n'en utiliser que deux, le 3e étant disponible
ent à l'un des deux premiers.

pareils Cowper et Whitwell. — Les appareils en usage se
eux types principaux portant le nom de leur inventeur :
itwell.
point de vue de la circulation des gaz et de l'air les pen-
x systèmes *Calder* et *Wasseralfingen.*
ns ci-dessous les figures schématiques de ces appareils
rincipe de leur construction et de leur fonctionnement,
t d'en donner plus loin les divers perfectionnements :

E COWPER.
ié en 1860).

il Cowper, les gaz du
sont d'abord amenés
ine de 1m. à 1m.30 de
rencontrent l'air des-
stion; ils s'y allument
ju'au haut de l'appa-

s redescendent du haut
ombustion par tout le
ion et s'y partagent
d nombre de canaux
s conduits parallèles
s, *soit en chicanes*).
ans cet appareil, les
me seule fois toute la
ndre.
n appareil à *courte*
i conduits multiples.
wper a un excellent
rifique.

TYPE WHITWELL
(*Imaginé en 1865*).

L'appareil Whitwell est divisé par une série de cloisons parallèles de 20 centimètres d'épaisseur environ ayant une largeur de 30 centimètres et pour longueur les cordes du cercle.

Les cloisons de rang impair ne montent pas jusqu'à la voûte laissant en haut de larges ouvertures ; celles de rang pair sont fermées par le haut et ont de larges ouvertures près de la sole ; l'ensemble est relié par des murettes transversales à jour. Les gaz viennent se brûler dans une première chambre plus grande que les autres où des filets d'air sont injectés par des conduits traversant la cloison.

Les gaz serpentent donc 4 à 5 fois de la sole à la voûte avant de se rendre dans la cheminée.

C'est donc un appareil *à longue circulation et à conduit unique.*

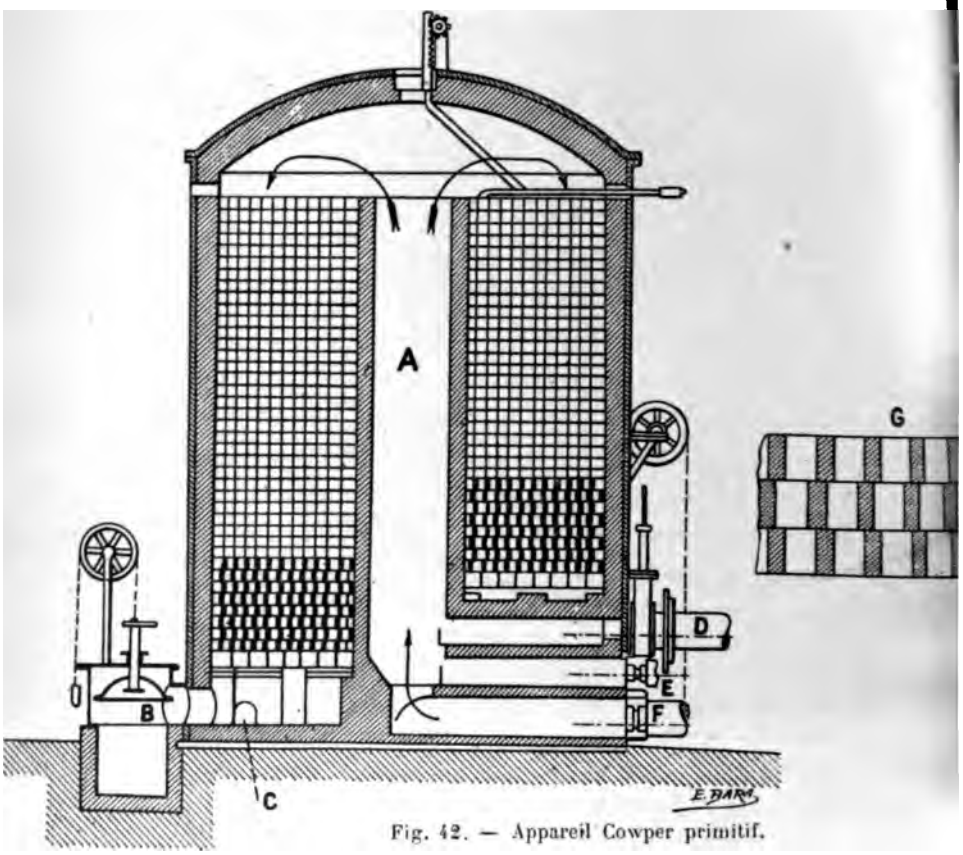


Fig. 42. — Appareil Cowper primitif.

A, Gaine centrale de combustion. — *B*, Arrivée d'air venant de la machine soufflante — *C*, Sortie des gaz brûlés vers la cheminée — *D*, Sortie de l'air chaud vers les tuyères — *E*, Arrivée de l'air extérieur. — *F*, Arrivée de gaz venant du haut fourneau — *G*, Disposition des briques.

TYPE COWPER (*Suite*)

On admet en pratique que deux Cowper valent trois Whitwell.

Le seul inconvénient du Cowper consiste dans l'encrassement rapide des empilages de briques par l'entraînement des poussières et dans la difficulté relativement grande des nettoyages.

Dans cet appareil, il faut, pour passer le hérisson dans chaque carneau, *en admettant qu'il soit rectiligne*, pénétrer sous la voûte et, par suite, laisser à l'appareil le temps de se refroidir.

TYPE WHITWELL (*Suite*)

Le poids des briques est inférieur à celui d'un appareil Cowper, la surface de chauffe bien plus faible et la vitesse de circulation plus forte.

La puissance calorifique est par suite bien inférieure.

Un des avantages du Whitwell consiste dans les facilités du nettoyage. On peut par les grands orifices ménagés à la partie supérieure passer aisément des hérissons, sans qu'on soit obligé de le laisser se refroidir.

.— *Accessoires des appareils.*—Quel que soit l'appareil à air chaud

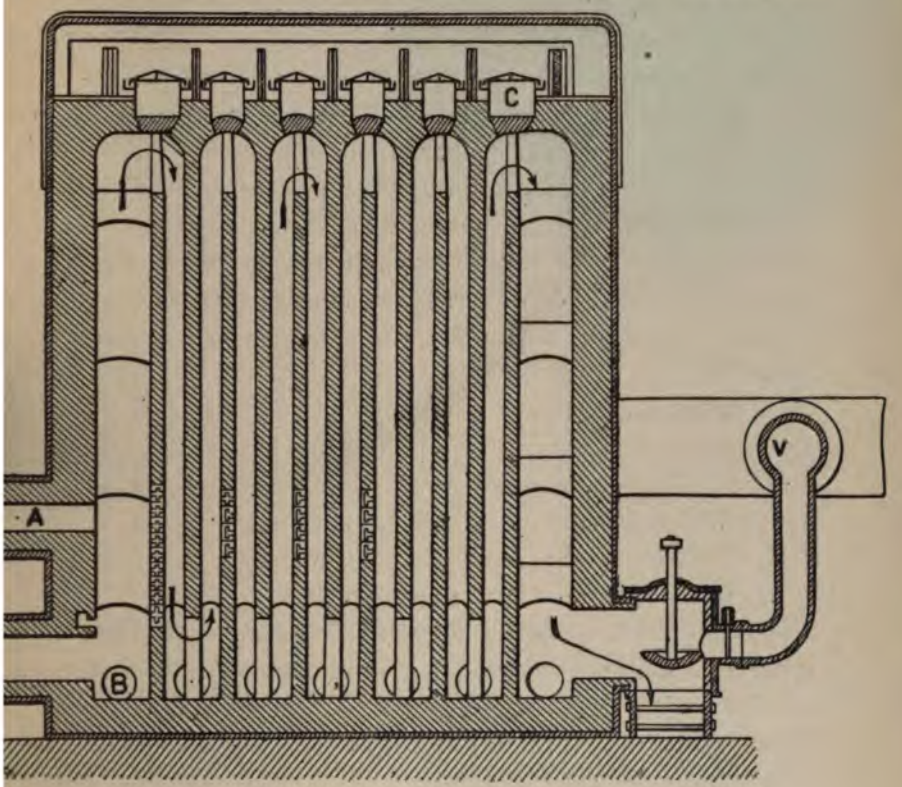


Fig. 43. — Appareil Whitwell primitif.

. Air de la soufflerie. — *B*. Arrivée d'air froid. — *C*. Clapet de nettoyage. — *G*. Gaz aut fourneau. — *V*. Vent chauffé allant aux tuyères.

ployé, on trouve une série analogue d'ouvertures et de registres :
° *Valves.* — La valve à air chaud est refroidie pour résister à la te température qu'elle supporte soit par un courant d'eau, soit par filet d'air froid venant de la soufflerie. La valve à gaz est une sorte soupape à cloche toujours complètement ouverte pour l'arrivée du et dont on règle le débit par un registre plus mobile placé à proxi-é.

Les orifices étroits amenant l'air nécessaire à la combustion sont elés *brûleurs*, ils sont munis de tiroirs ou de soupapes mobiles r le réglage.

Souvent les entrées d'air sont éloignées des valves à air chaud ou à , l'air circulant d'abord dans des conduits pratiqués sous la sole de

l'appareil, dans la périphérie ou dans une région déterminée de la gaine de combustion, afin qu'il puisse s'échauffer.

La valve à vent venant de la machine soufflante et la valve aux gaz brûlés sont disposées du côté opposé aux trois premières.

2° *Manœuvre du renversement.* — Cette manœuvre consiste à mettre au vent l'appareil qui était au gaz; pour cela on ferme la valve et le registre à gaz, on laisse un instant les brûleurs ouverts ainsi que la valve de la cheminée pour purger l'appareil des gaz incomplètement brûlés et éviter les mélanges détonants qui pourraient se produire à la rentrée de l'air. Puis, on ferme tout et on ouvre la valve par où passe le vent venant de la soufflerie et celle par où s'échappe ce vent réchauffé.

On met ensuite au gaz l'autre appareil en fermant la valve à vent chaud, puis, celle à vent froid et les brûleurs par lesquels sort l'air comprimé. La valve de la cheminée est alors ouverte ainsi que la valve à gaz en faisant fonctionner progressivement son registre.

3° *Conduites.* — Les conduites de gaz et d'air sont en tôle de fer et ont une section de 1 mètre carré environ.

Il y a plusieurs conduites de gaz : celle reliant le haut-fourneau aux appareils à air chaud et celle le reliant aux chaudières des machines soufflantes.

Ces conduites sont munies de clapets de sûreté qui peuvent se soulever aisément en cas d'explosion.

Les gaz entraînant une grande quantité de poussières (de chaux, de manganèse, etc...) il importe, pour ne pas trop encrasser les appareils à air chaud, de ménager sur le trajet de gaz des larges *tambours* pour en favoriser le dépôt. Des clapets de vidange sont, en outre, disposés à la partie inférieure des tuyaux.

On peut activer le dépôt des poussières en faisant tomber une pluie d'eau dans les branches verticales ; dans les branches horizontales on installe des laveurs spéciaux.

La conduite de vent chaud doit être garnie intérieurement de briques réfractaires, elle se termine à chaque haut-fourneau par une conduite circulaire qui entoure les étalages.

C'est de cette conduite que partent les porte-vent : tuyaux coudés réunis par un joint télescopique au tuyau horizontal se rendant à la tuyère.

Sur le coude du porte-vent, dans le prolongement de l'axe de la

tuyère, on dispose un œilleton muni d'un verre coloré qui permet de regarder sans être ébloui dans l'intérieur du haut-fourneau.

La buse, sorte d'ajutage étroit, pénétrant dans la tuyère, se fixe au bout du tuyau porte-vent.

Sur les conduites ci-dessus énumérées sont ménagés des vannes et registres que nous ne faisons que signaler : soit près du gueulard, soit près des chaudières de la soufflerie.

Le bout de la buse est placé en arrière de l'œil de la tuyère afin de rafraîchir celle-ci par le jet du vent ; cette disposition a, de plus, l'avantage de mieux abriter la buse contre la chaleur ardente du foyer.

Article 3. — Perfectionnements apportés aux appareils en briques

Nous étudierons d'abord les modifications apportées successivement aux appareils Cowper, puis aux appareils Whitwell.

I. — *Appareils Cowper.*

1° *Modification dans l'emplacement de la gaine.* — Une des premières modifications a consisté à placer la gaine de combustion non plus dans l'axe même de l'appareil, mais près de la périphérie.

On a ainsi simplifié la construction de l'appareil et facilité la visite et le nettoyage de la gaine.

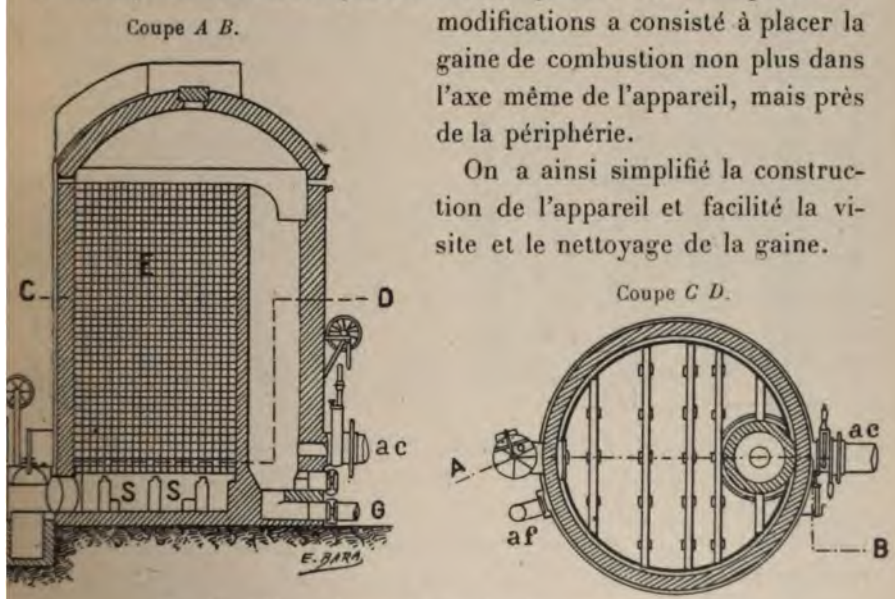


Fig. 44 et 45. — Appareil à air chaud, système Cowper.

E, Empilages des briques. — *G*, Arrivée des gaz des hauts-fourneaux. — *a*, Arrivée de l'air extérieur. — *af*, Arrivée d'air froid de la machine soufflante. — *ac*, Sortie de l'air chaud vers les tuyères. — *S*, Sortie des gaz brûlés vers la cheminée.

Les premiers appareils étaient assez bas (8 m. de hauteur sur 7 à 8 mètres de diamètre). On a augmenté leur hauteur qui peut atteindre aujourd'hui 16 mètres et même plus.

Il vaut mieux, en effet, augmenter la hauteur que la largeur, afin que les gaz ne se répartissent pas inégalement sur la section.

Le diamètre des appareils anciens a donc été conservé.

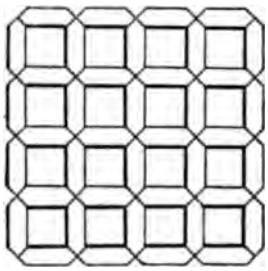


Fig 46. — Carneaux rectangulaires (Briques en biseaux).

Les briques ne sont plus disposées en chicanes. Cette disposition avait pour but de multiplier la surface de chauffe en augmentant la largeur du circuit, mais elle avait un grand inconvénient provenant de l'impossibilité de nettoyer l'appareil au bout d'un certain temps de marche.

Les poussières finissent, en effet, par s'accumuler à la longue dans les carneaux en quantités considérables ; cet inconvénient s'exagère quand on marche en certaines fontes spéciales telles que les ferromanganèses notamment (*poussières de* Mn^3O^4).

Or, ces poussières obstruent les conduites, elles changent la conduc-

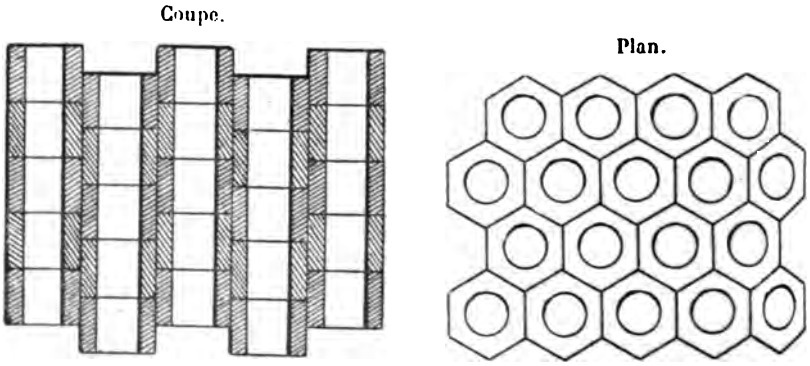


Fig. 47 et 48. — Carneaux par briques hexagonales.

tibilité des briques qu'elles couvrent parfois d'une couche épaisse et constituent souvent des mélanges de corps à points de fusion relativement peu élevés par rapport à celui des briques. Il en résulte, en dehors de l'obstruction même causée par les poussières qui sont réfractaires, une formation de laitiers spéciaux coulant vers la partie infé-

rieure de l'appareil et gênant dans de fortes proportions la circulation des gaz (1).

2° *Modification dans la construction des carneaux.* — Aussi constitue-t-on les carneaux des appareils Cowper par une série d'alvéoles lisses et carrées déterminées par deux séries de murettes perpendiculaires.

Le nettoyage en est possible en y passant un hérisson.

M. de Vathaire recommande de construire les carneaux avec des briques taillées en biseau aux extrémités, briques s'emboîtant les unes dans les autres. Par ce mode de construction, on s'oppose au déplacement latéral ; ce qui augmente la solidité des carneaux.

Enfin, on a imaginé des briques creuses, moulées sous forme de prismes carrés ou hexagonaux remplissant toute la section ; elles sont percées, suivant leur axe, d'un canal cylindrique et donnent, par leur juxtaposition, une série de cheminées à axes parallèles.

Les carneaux ont de 8 à 15 centimètres de côté ; il ne faut pas exagérer leur surface, car la puissance d'emmagasinement de la chaleur est diminuée.

L'épaisseur des briques varie de 4 à 6 centimètres.

Ce type à briques creuses ou hexagonales est le type dit américain.

3° *Système Harvey.* — Le système *Harvey* est une sorte de *Cowper* modifié.

Les gaz arrivent à la partie inférieure par les voûtes supportant tout le massif de l'appareil.

La chambre à briques ou ruche (*à cause de ses briques creuses à section hexagonale*) remplit tout le cylindre et repose sur des chambres voûtées qui se trouvent à la base et où se brûlent les gaz venant du haut fourneau.

Les produits brûlés traversent la chambre à briques en montant et s'échappent par la voûte supérieure.

L'installation est simple, mais on conçoit aisément que ces voûtes qui supportent toute la construction constituent le point faible de l'appareil : elles se trouvent, en effet, exposées au maximum de chaleur, circonstance peu favorable à la solidité.

(1) L'enlèvement des poussières est une question qui préoccupe tout spécialement depuis quelques années les ingénieurs de haut-fourneau. Des solutions fort ingénieuses basées sur l'emploi de courants électriques ont même été proposées par le regretté M. Boivin ; nous ne pouvons que les signaler.

On voit sur la figure comment sont disposés les différents échappements ou arrivées d'air.

4° *Système Ford et Moncur.* — Ce sytème d'invention assez récente tend à se répandre de plus en plus en *Angleterre* où il a donné des résultats très satisfaisants. Nous le décrirons très succinctement d'après le *Journal of the Iron and Steel Institute de 1896, n° 1.*

Considérons une section droite à la partie inférieure de l'appareil : l'espace compris entre deux murs parallèles équidistants du centre constitue la *chambre de combustion.* Cette chambre de combustion se prolonge par des empilages constitués par deux séries de murs parallèles ; les murs de la première série étant perpendiculaires à ceux de la deuxième. Ces murs parallèles sont supportés par des voûtes et par des cloisons transversales.

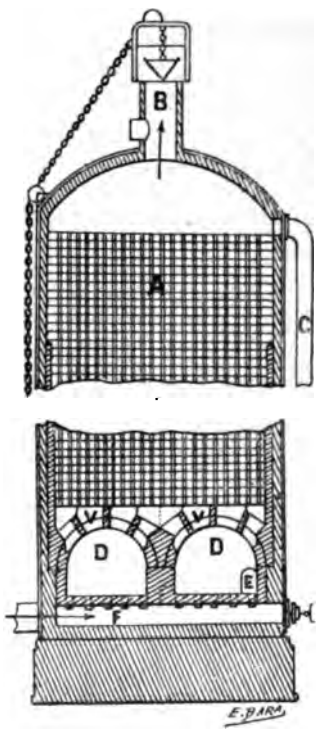


Fig. 49. — Appareil Harvey.

A, Chambre à briques ou ruche. — *B*, Sortie des gaz brûlés. — *C*, Sortie de l'air réchauffé. — *DD*, Chambres de combustion. — *E*, Arrivée des gaz. — *F*, Arrivée de l'air froid. — *VV*, Voûte support.

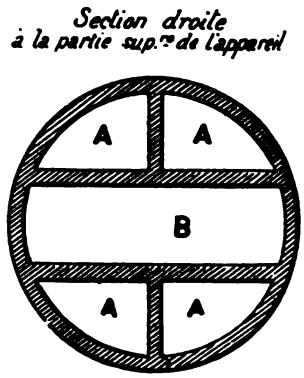


Fig. 50. — Appareil Ford et Moncur.

A A A A, Quadrants avec empilages en zig-zag. — *B*, Chambre de combustion.

Deux murs maîtres perpendiculaires aux murs de la chambre de combustion divisent l'appareil *sur toute sa hauteur* en quatre quadrants indépendants, comprenant des empilages en zigzag constitués par des briques spéciales.

Ces quatre quadrants communiquent avec une chambre située au-

: de la chambre de combustion, chambre communiquant avec
ıinée et avec la conduite des machines soufflantes par quatre
munies de valves qu'on peut ma-
r de l'extérieur.

la chambre de combustion se
.t disposés, les uns au-dessus des
les carneaux d'arrivée de l'air,
ı gaz et enfin la conduite de vent

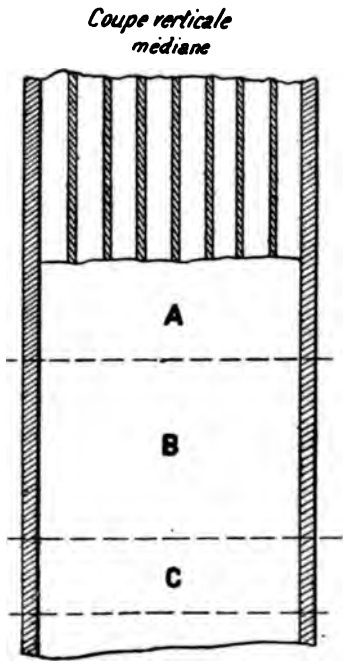


Fig. 51. — Appareil Ford et Moncur. — Coupe verticale.

A, Murettes situées au-dessus de la chambre de combustion et comprises entre deux murs maîtres parallèles au plan médian de l'appareil.— *B*, Chambre de combustion où débouchent les carneaux d'arrivée de l'air, ceux du gaz et la conduite de vent chaud. — *C*, Chambre spéciale sous la chambre de combustion communiquant avec la cheminée et avec la conduite des machines soufflantes.

I. — *Appareils Whitwell.*

augmenter la puissance calori-
:s Whitwell on a modifié le type
', de façon à conserver une grande
le ses avantages au point de vue
acilité des nettoyages, tout en
iant l'étendue des surfaces chauf-

étudierons quelques types de
:ll modifiés.

'hitwell à chambres divisées. —
es appareils Whitwell de cons-
ı récente dits à chambres divi-
ı a diminué le nombre des cir-
on les a organisés en conduits
es. Il n'y a plus que deux cir-
:s gaz montent par une chambre
redescendent par une chambre
en cinq ou six compartiments
; murettes parallèles aux cloisons principales. Le courant
i divisé en autant de lames minces, puis il remonte de nouveau
:onduit unique assez large et redescend par une autre chambre
analogue à la première.

toujours, en somme, le système du serpentin, mais modifié
eusement puisqu'il y a division du courant fluide en plusieurs
ns deux branches de ce serpentin. Malgré cela, un Cowper, de

mêmes dimensions, offre encore beaucoup plus de surface de chauffe.

2° *Système Whitwell-Cowper ou Lévêque.* — Dans ce système, on a essayé de réunir, dans une certaine mesure, les avantages inhérents aux deux types Whitwell et Cowper.

Les gaz circulent d'abord dans des chambres étroites analogues à celles d'un Whitwell, puis traversent finalement une chambre beaucoup plus large, cloisonnée comme un Cowper. Ils n'y arrivent, par suite, qu'après le dépôt de la plus grande partie des poussières qu'ils ont entraînées.

3° *Système Massik et Crookes.* — Cet appareil fonctionne comme un Whitwell avec cette différence que les cloisons de séparation des chambres, au lieu d'être disposées suivant des plans verticaux parallèles ayant pour traces les cordes de la circonférence de base, sont constituées par des cylindres concentriques à l'axe de l'appareil.

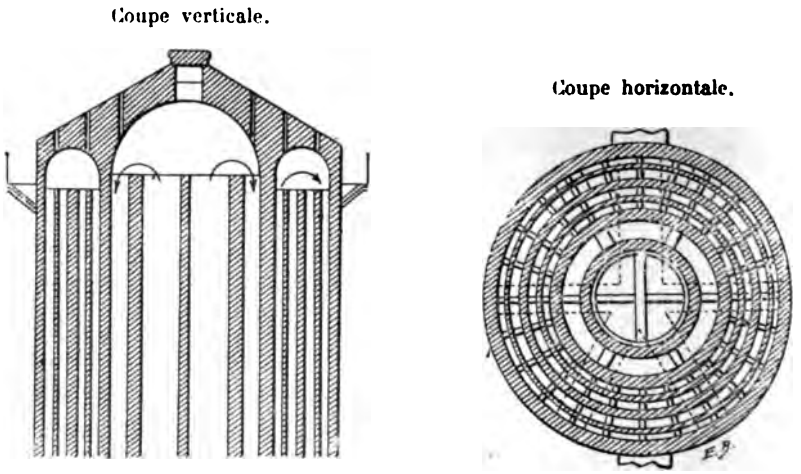
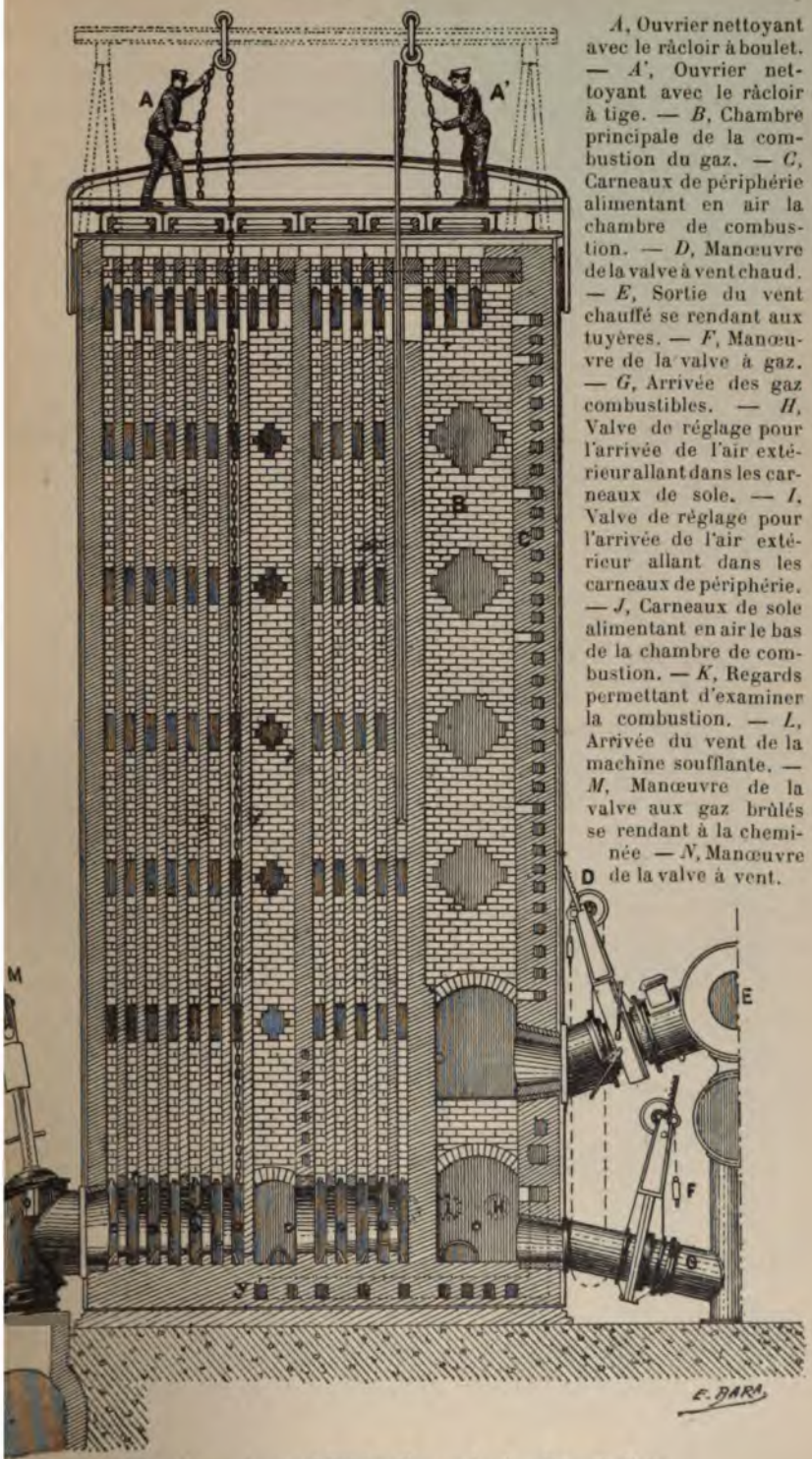


Fig. 52 et 53. — Appareils à compartiments annulaires de Massik et Crookes.

La gaine de combustion est dans le cylindre central ; les gaz brûlés gagnent l'extérieur en serpentant à travers une série de chambres annulaires.

Le vent, au contraire, arrive par la périphérie et s'échappe en gagnant le centre, d'où il peut sortir pour aller aux tuyères.

Les parties les plus chaudes étant au centre, la déperdition de chaleur est moins grande.



A, Ouvrier nettoyant avec le râcloir à boulet. — *A'*, Ouvrier nettoyant avec le râcloir à tige. — *B*, Chambre principale de la combustion du gaz. — *C*, Carneaux de périphérie alimentant en air la chambre de combustion. — *D*, Manœuvre de la valve à vent chaud. — *E*, Sortie du vent chauffé se rendant aux tuyères. — *F*, Manœuvre de la valve à gaz. — *G*, Arrivée des gaz combustibles. — *H*, Valve de réglage pour l'arrivée de l'air extérieur allant dans les carneaux de sole. — *I*, Valve de réglage pour l'arrivée de l'air extérieur allant dans les carneaux de périphérie. — *J*, Carneaux de sole alimentant en air le bas de la chambre de combustion. — *K*, Regards permettant d'examiner la combustion. — *L*, Arrivée du vent de la machine soufflante. — *M*, Manœuvre de la valve aux gaz brûlés se rendant à la cheminée. — *N*, Manœuvre de la valve à vent.

Fig. 54. — Appareil Whitwell pour le chauffage de l'air.

Article 4. — Appareils de fermeture et de chargement

Le gueulard des hauts-fourneaux est presque toujours muni d'appareils destinés à faciliter le chargement et à recueillir les gaz.

I. — *Notions générales.*

A. — *Du chargement.* — Il faut que le mélange qui arrivera dans l'ouvrage ait toujours une composition régulière et uniforme. Ce n'est pas en mélangeant intimement le coke et le minerai qu'on atteindra ce but, car le minerai, à cause de sa masse, descend toujours plus vite que le coke. Il vaut mieux charger les deux matières par couches assez épaisses. Ces couches en descendant se creusent au centre, car les parties voisines des bords sont retenues par le frottement contre les parois, elles prennent la forme d'entonnoirs qui se pénètrent les uns les autres et à une certaine profondeur, une même section horizontale en coupe plusieurs. L'ouvrage peut donc recevoir un mélange assez régulier.

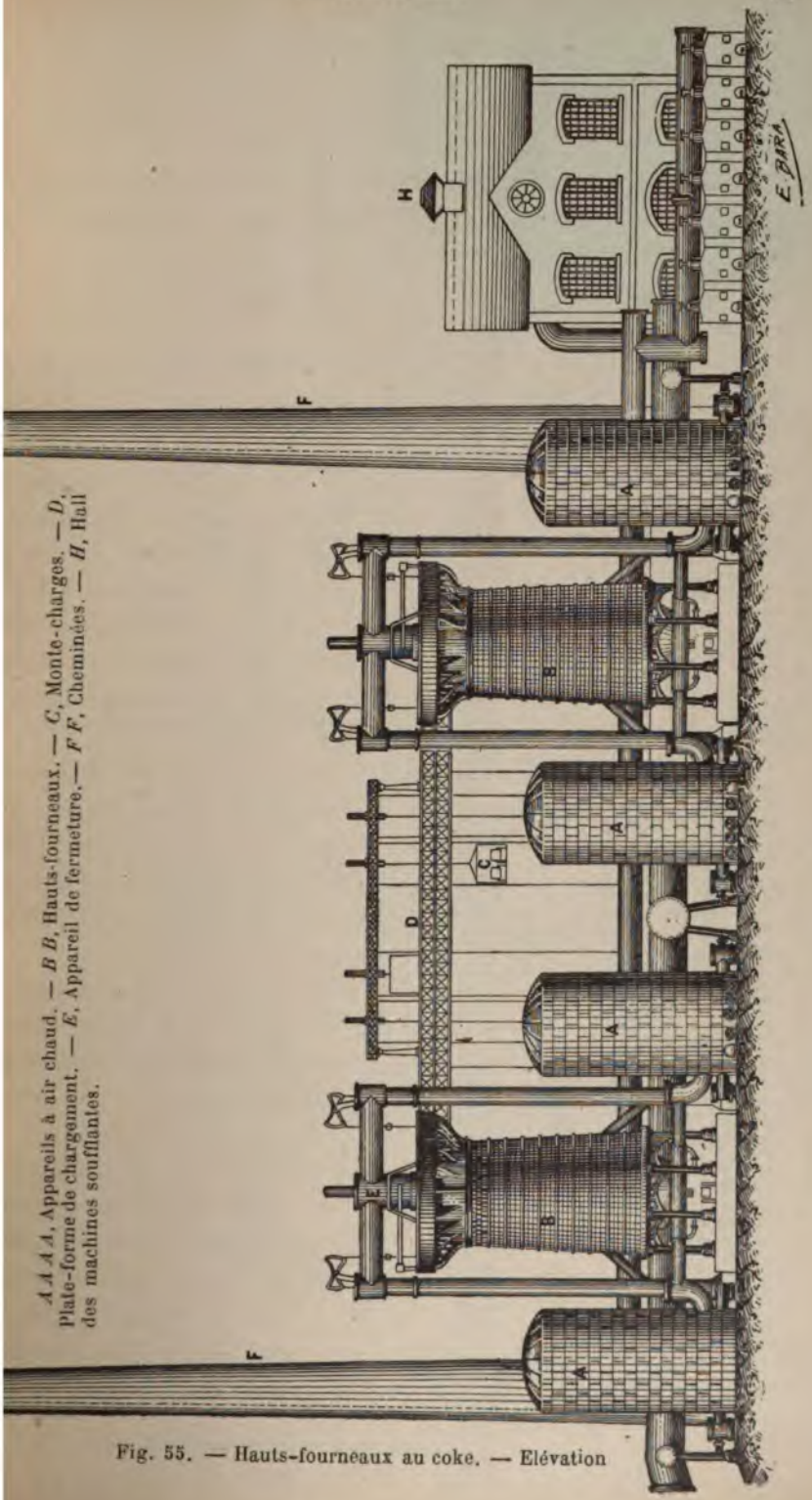
De plus, les morceaux de minerai un peu gros ont tendance à gagner le centre ; les couches de minerai s'épaississent alors au centre et, inversement, celles de coke s'épaississent au bord. Il y a donc lieu de s'opposer à cet effet en chargeant, de préférence, le minerai près des bords et le coke au centre sans exagérer, toutefois, cette répartition, sous peine de provoquer une descente irrégulière.

D'un autre côté, les gaz ont une tendance marquée à s'élever en suivant le chemin des parois qui est le plus facile et le moins sinueux.

Or, si le coke qui constitue une masse relativement perméable aux gaz est près des parois, le minerai qui sera en proportion plus grande vers le centre ne subira dès lors qu'une réduction incomplète.

En plaçant le minerai plus près des bords on l'expose mieux à l'action réductrice et on régularise, en outre, la répartition des gaz parce que la prédominance du coke rend la colonne centrale plus perméable.

S'il arrivait, toutefois, que le minerai fût composé presque exclusivement de menu, il y aurait intérêt à le charger à peu près uniformément sur toute la surface du gueulard, de façon qu'en aucun cas ce menu ne puisse s'agglomérer en masses compactes. Réparti à peu près



A A A A, Appareils à air chaud. — *B B*, Hauts-fourneaux. — *C*, Monte-charges. — *D*, Plate-forme de chargement. — *E*, Appareil de fermeture. — *F F*, Cheminées. — *H*, Hall des machines soufflantes.

Fig. 55. — Hauts-fourneaux au coke. — Elévation

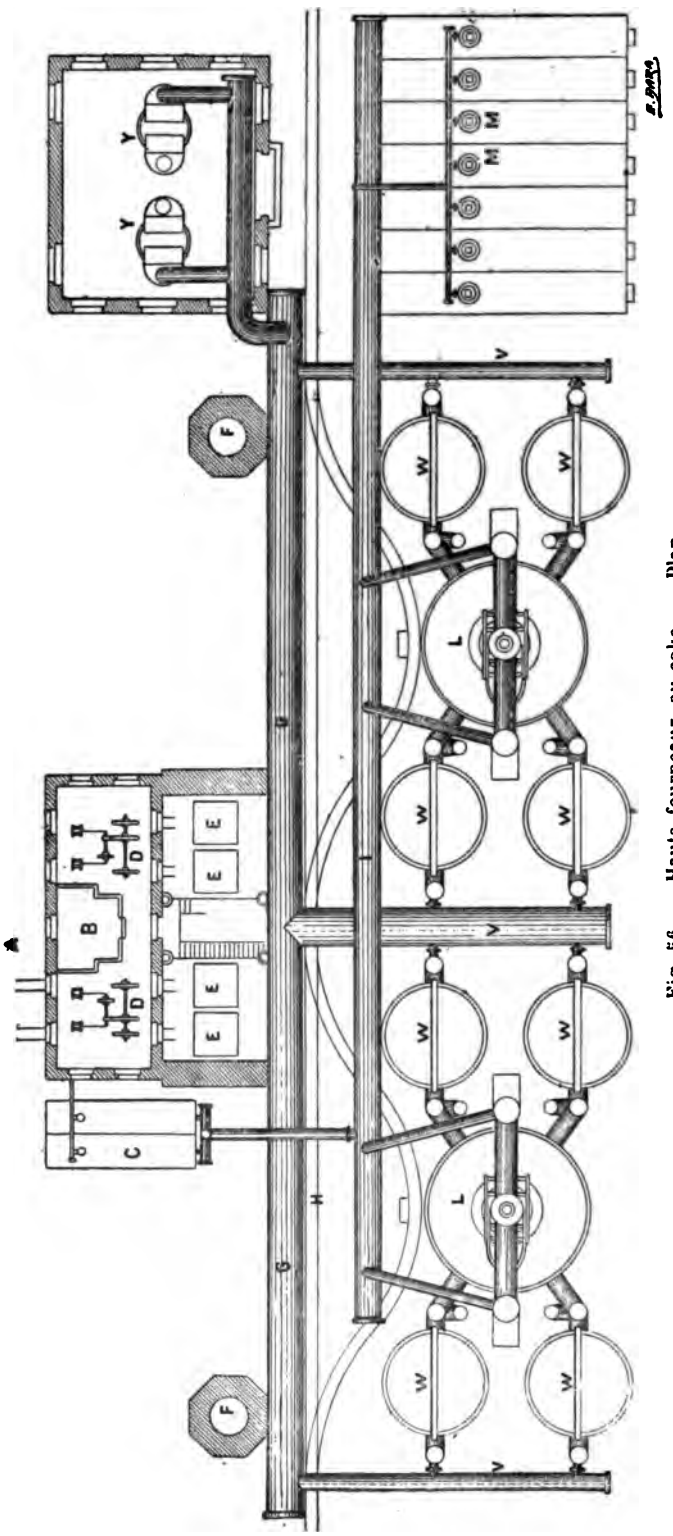


Fig. 56. — Hauts-fourneaux au coke. — Plan.

A, Arrivages par chemin de fer. — *B*, Bureau. — *C*, Chaudières. — *D*, Machines de monte-charges. — *E E*, Monte-charges. — *F*, Cheminées d'évacuation des gaz brûlés. — *G*, Réservoir de vent. — *H*, Voie de décrassage. — *I*, Conduite de gaz. — *L L*, Hauts-fourneaux. — *M M*, Chaudières chauffées soit par la combustion d'une partie des gaz combustibles du haut-fourneau, soit par la totalité de ces gaz. — *W W*, etc., Appareils Whitwell. — *Y Y*, Machines soufflantes.

ıent sur toute la section, il aura tendance à descendre verti-
:n se frayant un passage à travers les gros morceaux du
ıt.

rganes du chargement. — Dans les anciens hauts-fourneaux
ıit au *panier* ou à la *brouette;* on eut recours, plus tard, à
ıs plus prompts en adoptant le chargement par wagons.
ɔn contenant la charge est soulevé par un ascenseur et amené
de la plate-forme du gueulard, puis poussé sur des rails
est conduit au-dessus du gueulard s'il est à fond mobile, ou
ɔrd, auquel cas on le fait basculer autour d'un de ses côtés.
voir comment la charge ainsi versée se répartit au gueulard;
; proposons de l'expliquer à propos de la description des
le fermeture dont sont munis la plupart des grands hauts-
actuels. Ces appareils jouent en même temps le rôle de
rs et permettent le chargement par grands wagons.

II. — *Description des appareils.*

areils de fermeture et de chargement sont très nombreux,

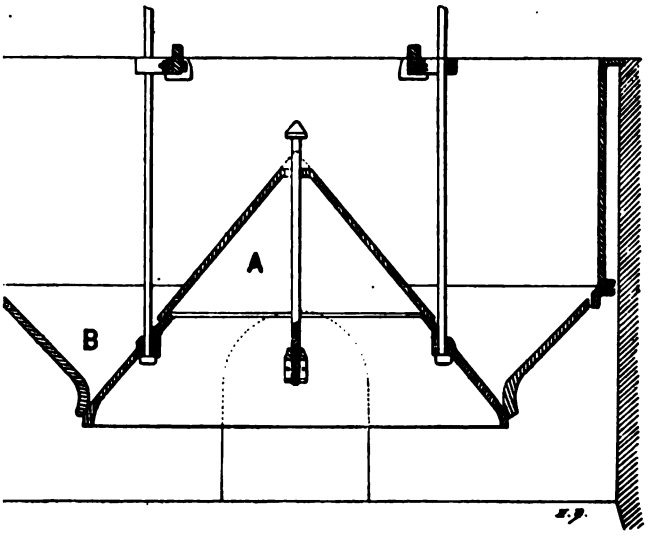


Fig. 57. — Cup and cone.
A, Cone. — *B*, Cup.

oup ne diffèrent entre eux que par des modifications sans

importance ; d'autres sont fort compliqués. Nous devrons borner notre étude à ceux qui sont le plus ordinairement employés.

A. — *Cup and cone.* — Cet appareil adopté d'abord en Angleterre est le plus répandu et le plus simple.

L'appareil comprend une *trémie* en fonte dont les parois sont inclinées vers le centre et un *cône mobile* en tôle de fer qui s'engage dans cette trémie et en ferme le fond.

La trémie ne doit pas être scellée dans les parois, elle doit être simplement posée de façon à pouvoir se soulever en cas d'explosion.

Souvent le cône est fait en deux morceaux, la partie supérieure re-

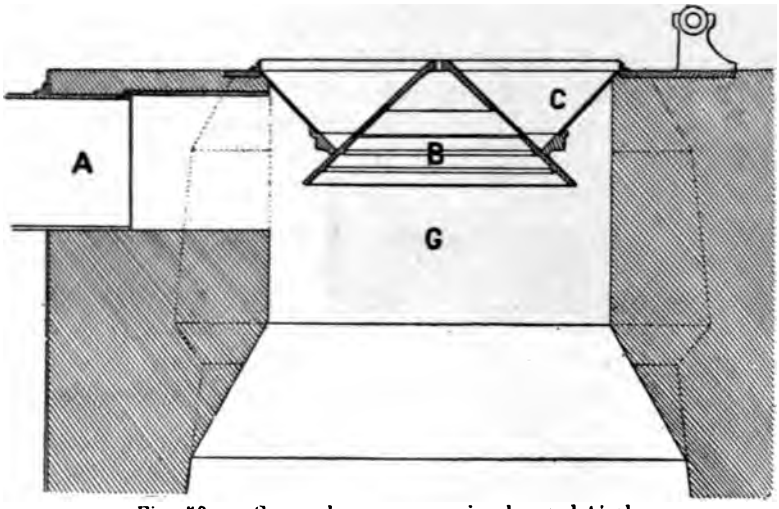


Fig. 58. — Cup and cone avec prise de gaz latérale.
A, Prise de gaz latérale. — *B*, Cône. — *C*, Cup, *G*, Gueulard du haut-fourneau.

posant sur une base annulaire dont elle peut se séparer pour se soulever sous la pression des gaz. Ce soulèvement est limité à 10 ou 15 centimètres par un boulon de réglage.

La charge est versée d'avance dans la trémie : quand on abaisse le cône, elle roule sur la surface et tombe en couronne sur le pourtour de la cuve.

L'angle au sommet du cône et le diamètre de sa base sont les deux éléments principaux dont dépend la répartition. Plus la base est large, plus les charges sont déposées près des bords. Les charges glissant le long de la surface du cône sont projetées dans le fourneau suivant une direction oblique ; elles décrivent donc une parabole tangente à l'ori-

ıux génératrices de ce cône et vont tomber à une distance de sa
ıui augmente avec l'angle au sommet et aussi avec le temps que
a chute.

'on charge à de petites intervalles, il y aura peu de vide sous le
les matières tomberont près du cercle de base ; dans le cas con-
, le minerai sera projeté plus près des bords.

levée du cône n'est pas non plus sans influence ; plus le cône sera
ié, plus la charge tombera sur une plus grande surface ; sa partie
eure arrivant plus près des bords de la cuve.

ec le *cup and cone* les prises de gaz sont latérales, les gaz sortent
ne série d'orifices percés dans les parois de la cuve et disposés
intervalles réguliers le long d'une circonférence horizontale. Ils
ıissent ensuite dans une conduite qui fait le tour du fourneau.

— *Appareils à prise centrale.* — Dans les appareils à prise cen-

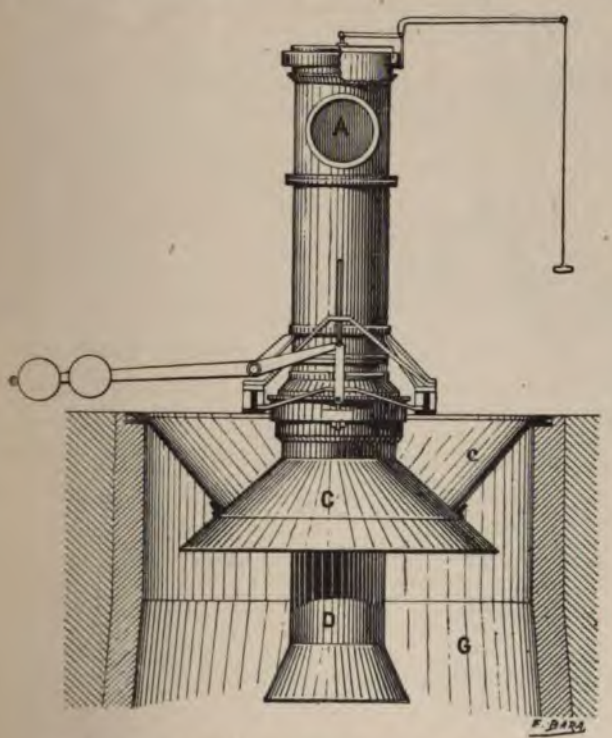


Fig. 59. — Cup and cone avec prise de gaz centrale.

. Conduite du gaz combustible. — *C*, Cône. — *c*, cup. — *D*, Prise de gaz centrale.
G, Gueulard.

trale, les gaz s'échappent par un tuyau vertical qui plonge dans la cuve suivant son axe et qui fait actuellement partie intégrante de l'appareil de fermeture et de chargement. Tous ces appareils dérivent plus ou moins complètement du cup and cone.

Dans les anciennes installations où le gueulard était ouvert (*ou fermé, mais sans appareil de chargement distributeur*), la prise de gaz centrale se faisait à une certaine profondeur.

Tandis que la prise de gaz latérale accentue la tendance des gaz à suivre les parois, ce qui est un inconvénient, la prise de gaz centrale les attirera, au contraire, loin des parois.

Mais cette action est d'autant plus sensible que les prises de gaz sont placées plus bas.

L'*appareil Hoff* dérive du cup and cone en supposant le sommet du cône ouvert et disposé pour la sortie des gaz. A cet effet, le cône est tronqué et se termine en haut par une partie cylindrique qui se raccorde à une conduite verticale fixe et suspendue.

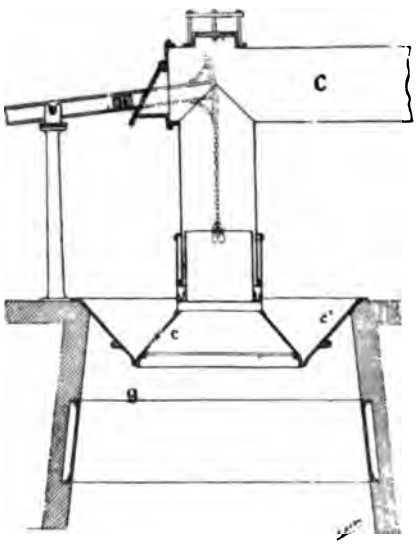


Fig. 60. — Appareil Hof.

C, Conduite de gaz. — *c*, Cône. — *c'*, Cup. — *g*, gueulard.

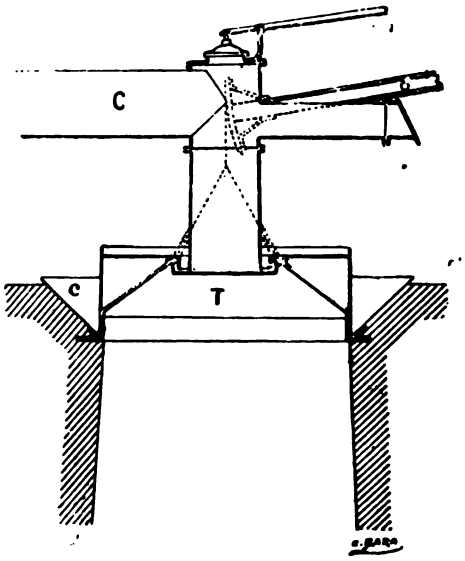
Le raccord se fait par un joint hydraulique qui permet d'abaisser le tronc de cône sans interrompre la continuité.

Cet appareil offre l'inconvénient de ne pas permettre l'emploi d'un wagon central.

L'appareil *Langen* a précédé l'appareil *Hoff*. Le tronc de cône mobile en forme de cloche est placé au-dessus de la trémie et, pour charger, on le relève au lieu de le baisser.

Pour obtenir une répartition convenable des matières, la trémie employée doit être large et à pourtour redressé. S'il n'en était pas ainsi on s'exposerait aux inconvénients résultant du chargement central.

avec cet appareil, on peut ouvrir bien complètement le gueulard et par



61. — Apareil Langen avec prise centrale de gaz. — *C*, Conduite de gaz. — *c*, cup. *T*, Tronc de cône mobile.

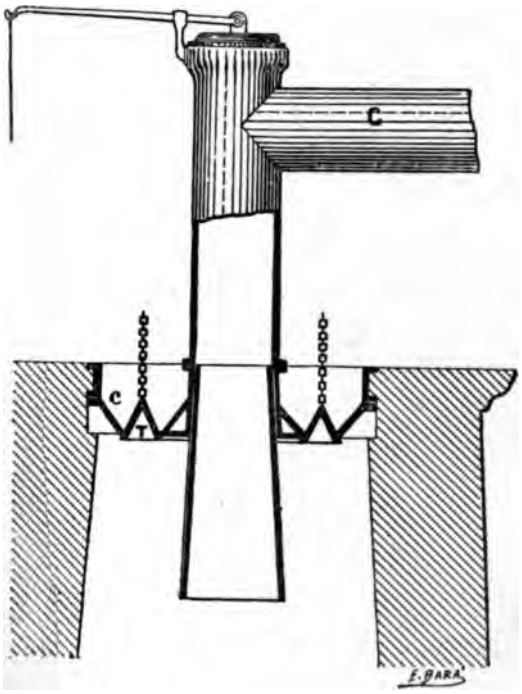


Fig. 62. — Appareil Coingt. — *c*, Cup. — *T*, tore à section triangulaire. — *C*, Conduite de gaz.

suite on rend sa visite et son nettoyage beaucoup plus faciles, ce qui peut être fort utile dans un très grand nombre de cas.

Avec l'appareil *Coingt* on réalise le double chargement et la prise de gaz centrale. Le double chargement consiste à pouvoir verser exclusivement le coke au centre et le minerai sur les bords.

La conduite de gaz verticale se termine à la partie inférieure par un tronc de cône. Entre ce tronc de cône et la trémie reste un espace annulaire obturé par une sorte de tore à section triangulaire.

Quand on abaisse ce tore, les matières qui ont été déposées dans la rainure extérieure entre lui et la trémie tombent près des bords, celles qu'on a versées dans la rainure intérieure du côté du tronc de cône tombent près du centre.

Les appareils à double chargement peuvent causer des erreurs dans le chargement si les ouvriers les manœuvrent à contre-sens. Or, il faut toujours tenir compte de l'inattention des ouvriers.

Les appareils que nous venons de décrire laissent toujours filtrer un peu de gaz entre la trémie et l'obturateur mobile. Pour obvier à cet inconvénient on a installé des fermetures dites *hydrauliques* compliquant davantage les types précédemment décrits, tels l'appareil *Minary* que nous ne faisons que signaler.

Article 5. — Les machines soufflantes et leurs chaudières, etc., etc.

Nous ne pouvons, sans sortir du but spécial de cette étude, donner la description détaillée des machines soufflantes, ventilateurs, chaudières, etc... existant nécessairement dans toute installation moderne de hauts-fourneaux. Les notions complètes sur ces organes si importants ressortissent à la mécanique ; nous nous bornerons par suite à des notions d'une très grande généralité.

I. — *Machines soufflantes.*

L'air nécessaire à la combustion doit être lancé dans le haut-fourneau avec une pression suffisante pour vaincre les résistances qui s'opposent à son passage. Le volume du vent lancé doit pouvoir être bien supérieur

débit normal afin d'agir sur l'allure, le cas échéant, comme on l'a pliqué antérieurement.

On admet en pratique que pour une tonne de coke consommée en 24 ures il faut 3 mètres cubes de vent par minute. Pour produire dans même temps 100 tonnes de fonte il faut lancer par minute 250 à 0 mètres cubes de vent.

Les machines soufflantes sont de puissants appareils ; simples ou mpound, elles sont à détente. Le moteur à détente devra se prêter x variations de la pression du vent.

Primitivement les machines étaient horizontales, on adopta ensuite s machines verticales dont quelques-unes sont des constructions énor- es et très coûteuses à cause des bâtis puissants destinés à en augmenter stabilité.

Dans les installations nouvelles, on est revenu aux machines hori- ontales moins lourdes et d'un prix de revient moins élevé. C'est ainsi u'au *Creusot* aux anciennes machines verticales (1) qui ne sont con- ervées que comme machines de secours ont succédé de non moins belles nachines horizontales. On a souvent reproché à ces dernières *ovalisation* du cylindre à vent résultant du poids du piston de ce ylindre. Le palliatif adopté a consisté à majorer le diamètre de la ige du piston et à guider cette tige non seulement par les presse- toupes, mais encore par une glissière à l'arrière du cylindre à vent (de Billy).

Enfin signalons, pour mémoire, qu'on rencontre encore dans les anciennes installations un certain nombre de machines à balancier.

Le diamètre des cylindres à vent varie d'ordinaire entre $1^{m}500$ et $2^{m}800$; celui des cylindres à vapeur varie entre 750 mm. et $1^{m}700$.

La course commune, généralement supérieure à 1 mètre, atteint quelquefois $1^{m}800$.

Le nombre des tours par minute oscille suivant les types de machines entre 25 et 40.

Les cylindres à vent sont pourvus de brides sur lesquelles viennent se boulonner les couvercles ou boîtes contenant les clapets pour l'aspiration et l'expiration de l'air.

(1) Ces magnifiques machines portent des noms bien appropriés à leur usage : *Simoum*, *Sirocco*, *Ouragan* et *Mistral*. C'était autrefois une des grandes attractions des visiteurs des usines du Creusot, tant le mouvement de ces grandes pièces verticales de machines était imposant.

Les clapets s'ouvrent, en général, en tournant autour d'un de leurs côtés servant de charnière; ils consistent en plaques de cuir ou de caoutchouc flexible rendues rigides par deux feuilles de tôle rivées. Les sièges et châssis sur lesquels ils s'appliquent sont en fonte rabotée, garnis quelquefois de feutre ou de caoutchouc. Ces clapets doivent pouvoir se fermer par leur propre poids quand la pression de l'air est la même sur leurs deux faces; des ressorts ou des leviers à contre-poids facilitent souvent leur fermeture. Dans les machines horizontales, ce sont les bases des cylindres qui reçoivent les clapets.

Signalons enfin l'emploi des *régulateurs* pour obvier à l'inégalité de la compression de l'air du commencement à la fin de la course du piston. Nous renvoyons aux traités de mécanique pour les données plus complètes concernant cette importante question des machines soufflantes. Pour ce qui concerne les valeurs usuelles de la pression du vent, il y a lieu de se reporter aux indications antérieurement données lors de l'étude théorique que nous avons consacrée aux réactions du haut-fourneau.

II. — *Chaudières des machines soufflantes.*

Une partie des gaz s'échappant des hauts-fourneaux est utilisée pour chauffer les chaudières des machines soufflantes.

Les gaz exigent pour brûler 60 à 70 0/0 de leur poids d'air. Le poids des produits de la combustion est donc environ le double du poids du vent à chauffer. Il suffira par suite d'utiliser à la production du vent chaud une proportion comprise entre la moitié et les deux tiers des gaz du gueulard. *Le reste sera brûlé aux chaudières.*

Dans toutes les installations anciennes, le chauffage des chaudières n'était pas exclusivement réalisé par la combustion des gaz venant du haut-fourneau. Des grilles chargées de houille étaient placées sous les chaudières; le cendrier était fermé par des portes. Les dispositifs d'arrivée du gaz étaient assez simples.

Le gaz arrivait dans une chambre ou boîte ordinairement en fonte d'où il sortait par un certain nombre d'ouvertures rectangulaires en autant de jets longitudinaux. L'air pénétrait en même temps par une fente horizontale au-dessous de cette boîte et aussi par un certain nombre d'ouvertures ménagées au-dessus de la porte du cendrier. On prévoyait, en outre, quelques arrivées supplémentaires d'air chauffé

des carneaux pratiqués dans la maçonnerie environnant le foyer, d'assurer la combustion complète des gaz combustibles.

ans d'autres installations, le gaz destiné au chauffage arrivait en du four par un carneau vertical auxiliaire et se mélangeait dans la on même où il débouchait avec l'air amené par plusieurs ajutages longueurs diffé- es, de façon à at- dre toute l'épais- du courant gazeux. e foyer à grille a r but de faciliter lammation du gaz ; e précaution est in- ensable dans des ches avec certains erais dont la ré- tion engendre des notablement char- de poussières de c. En outre, la grille donne un appoint de chaleur nécessaire sque la richesse des gaz en éléments combustibles vient à varier.

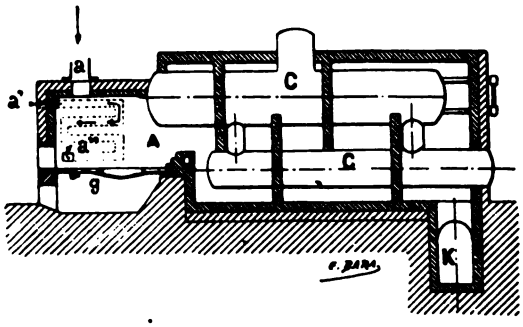


Fig. 63. — Chaudière avec grille, à deux corps superposés.

A, Chambre de combustion. — *a*, Arrivée du gaz combustible. — *a'*, Air froid. — *a''*, Air chaud. — *C C*, Chaudières. — *g*, Grille pour allumage. — *K*, Conduit de la cheminée.

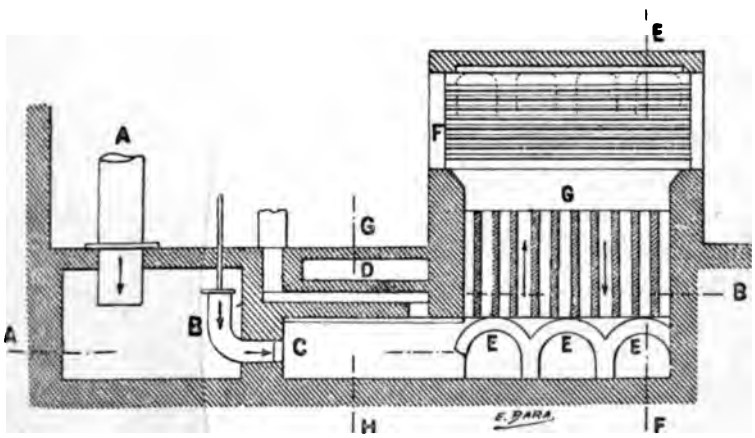


Fig. 64. — Chaudière sans grille. — Coupe par *C D* (voir figure 66).

On retrouve encore ce foyer à grille dans certaines installations actuelles lorsque des difficultés d'inflammation des gaz provenant d'une

cause quelconque peuvent se présenter ; mais, d'une façon générale, le chauffage se fait presque toujours avec les gaz seuls.

Nous donnerons pour mémoire quelques types d'installation de chauffage des chaudières.

Dans le type avec grille représenté par la figure 63, les chaudières sont à deux corps superposés. L'air froid venant de l'extérieur s'échauffe par sa circulation dans les parois d'une chambre de combustion A placée en avant de la chaudière. Il se mélange intimement aux gaz sous les chaudières mêmes, par suite d'une disposition de chicanes qui forcent le mélange gazeux à circuler alternativement sous la chaudière supérieure et la chaudière inférieure pour passer ensuite à la cheminée K. Dans ces chicanes sont ménagés, de

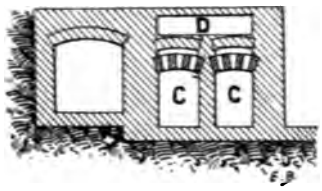


Fig. 65. — Chaudière sans grille. — Coupe par *GH*.

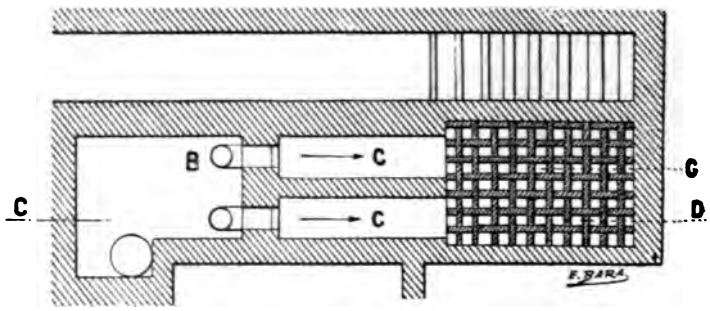


Fig. 66. — Chaudière sans grille. — Plan coupe par *AB*.

plus, des orifices ne se correspondant pas d'une chicane à l'autre ; il en résulte un brassage énergique des gaz.

Dans l'installation ci-dessus, il n'y a pas de grille, mais on assure, par des dispositifs spéciaux, soit le mélange des gaz et de l'air, soit leur inflammation.

Les gaz arrivent par le tuyau vertical A (coupe par CD) dans une première chambre et sont distribués par les prises B munies de clapets de réglage dans les carneaux C, puis en EE où ils se mélangent à l'air introduit par les carneaux DD. (Voir fig. 64, 65, 66 et 67.)

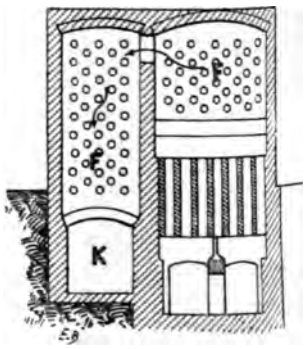


Fig. 67. — Coupe par *EF*.

nassif de briques G, appelé *récupérateur* ou *rallumeur*, consiste série de conduits verticaux : porté au rouge vif par une inflam- précédente, il garantit l'allumage du mélange des gaz et de l'air *après un arrêt très prolongé*) en même temps qu'il répartit éga- ce mélange sous la chaudière tubulaire placée en F.
produits brûlés s'échappent par la cheminée K.
t clair que les dispositifs adoptés pour les récupérateurs, les car- de circulation des gaz et de l'air, etc... peuvent varier de bien ınières suivant les usines.
ait néanmoins utile d'en décrire un type afin de donner une idée le sur l'organisation de ce chauffage au gaz. Nous n'aurions pu, ɔrtir du cadre de notre travail, classer rationnellement les dis- ; les plus répandus.

III. — *Autres machines.*

ɜ mentionnerons enfin, et pour mémoire, les pompes, monte- s, etc...
u sous pression est indispensable pour le refroidissement des et souvent pour les manœuvres du gueulard où la commande tons hydrauliques offre de grands avantages.
monte-charges servent à élever les wagonnets de coke, de fon- ɜt de minerai au niveau du gueulard.
n, nous devons aussi signaler les appareils dont le but est de asser les gaz des hauts-fourneaux des poussières dont ils sont s (*poussières de zinc notamment*). Ces appareils ne se rencontrent ns quelques installations où l'abondance des poussières les rend ıires.

Article 6. — Utilisation des sous-produits

– *Ciments de laitiers.* — On a songé à utiliser comme *ciments* iers du haut-fourneau quand l'allure de cet appareil les produit ıposition convenable. C'est surtout en *Allemagne* que cette fabri- spéciale, et particulièrement délicate, a eu un plein succès, mais ı'elle réussisse, il est essentiel que la marche du haut-fourneau ut à fait désulfurante. Ces ciments commencent, paraît-il, à

faire une sérieuse concurrence à ceux du *Portland*, vu leur bon marché exceptionnel.

B. — *Briques de laitiers*. — Les laitiers servent aussi depuis peu à confectionner d'excellentes briques propres à la construction. Après un concassage suivi d'un tamisage, on rassemble le poussier et on le mélange dans un malaxeur avec de la chaux éteinte dans les proportions de 10 de laitiers pour 3 de chaux. La pâte ainsi formée est passée à la presse où on la comprime dans des moules. Après démoulage, les briques sont séchées au soleil et acquièrent après cette opération une très grande dureté.

C. — *Sous-produits des gaz*. — L'*Engineering Review* a signalé, en 1896, deux nouveaux débouchés pour les sous-produits des gaz des hauts-fourneaux chauffés à la houille crue.

Le premier consiste dans la récupération du sulfate d'ammoniaque si recherché dans la fabrication des engrais artificiels.

Le second, sur lequel l'expérience n'a pas encore bien fixé, consiste dans l'extraction de l'iode. Les gaz circulent, à cet effet, dans des laveurs ; les eaux de lavage sont concentrées, puis lentement vaporisées. L'ammoniaque et les cyanures sont expulsés, le résidu contenant l'iodure et le chlorure de potassium est dissous et laisse déposer, par cristallisation partielle, l'iodure de potassium.

CHAPITRE IV

NOTES COMPLÉMENTAIRES

Nous avons dû reporter à la fin de l'étude du haut-fourneau deux notes complémentaires d'un ordre bien différent et ayant trait : l'une, à une question théorique du plus haut intérêt, l'autre, à des renseignements fort importants au sujet des centres de production des fontes. Placées dans les chapitres précédents, elles eussent nui à la clarté de l'exposition didactique.

Note A. — Étude du bilan calorifique du haut-fourneau (1)

Il est utile, pour se rendre un compte exact de la marche d'un haut-fourneau, de faire la balance des quantités de chaleur apportées par le vent ou produites par la combustion du carbone dans les différentes zones et des quantités de chaleur consommées, d'autre part, à l'intérieur de l'appareil ou perdues par conduction ou convection.

C'est à *Gruner* que revient l'honneur de cette étude théorique qu'il a magistralement traitée dans son remarquable ouvrage de métallurgie. Le premier, cet éminent Ingénieur a posé les bases de la métallurgie théorique ; nous verrons dans la suite quelle large part il faut lui attribuer dans les progrès considérables accomplis depuis trente ans dans les diverses branches de la sidérurgie moderne et de la métallurgie générale.

I. — *Chaleur totale fournie à l'appareil.*

A. — *Quantités de chaleur produites par la combustion.* — Soient p_1 le poids de carbone contenu dans la quantité de coke brûlé dans le haut-fourneau pour produire une tonne de fonte et p_2 le poids de carbone contenu dans la quantité correspondante de castine ajoutée comme fondant.

Soit, d'autre part, p_3 la quantité de carbone absorbée par tonne de fonte.

La quantité $P = p_1 + p_2 - p_3$ représentera la quantité totale de carbone se retrouvant dans les gaz dégagés au gueulard pour une tonne de fonte produite.

Représentons par g la valeur du rapport en poids de $\frac{CO^2}{CO}$ au gueulard et par c le poids de l'oxyde de carbone des gaz du gueulard correspondant à une tonne de fonte produite. On aura, d'après ce qu'on sait sur la composition de l'acide carbonique et de l'oxyde de carbone, comme autre expression de P :

$$P = \frac{3}{7}c + gc$$

(1) Voir dans le *Traité de fabrication de la fonte*, de M. de Billy, les compléments sur cette question : ils résument très clairement l'étude de Gruner.

D'où l'on déduit pour c (poids de CO) et pour gc (poids de CO^2) les valeurs suivantes :

$$c = \frac{77P}{33+21g}$$

$$gc = \frac{77Pg}{33+21g}$$

Calculons maintenant la chaleur de formation de CO^2 et de CO en tenant compte du poids p_2 de carbone existant dans l'acide carbonique de la castine et non brûlé, par suite, dans le haut-fourneau. La quantité de chaleur Q dégagée par la combustion sera :

$$Q = \frac{3}{7}c \times 2473 + \left(\frac{3}{11}gc - p_2\right) \times 8080,$$

les nombres 2473 et 8080 étant pris pour les valeurs des pouvoirs calorifiques de l'oxyde de carbone et du carbone.

Soit f le poids du fer contenu dans une tonne de fonte, il était combiné dans le minerai à un poids d'oxygène égal à $\frac{3}{7}$ f. Si la réduction de ce minerai par CO avait été complète, l'acide carbonique produit contiendrait un poids de carbone égal à $\frac{3}{4} \times \frac{3}{7}$ f, soit à $\frac{9}{28}$ f, et l'on trouverait au gueulard une quantité d'acide carbonique correspondant à un poids de carbone égal à $\frac{9}{28}$ f + p_2. La différence $\frac{9}{28}$ f + $p_2 - \frac{3}{11}$ gc ne peut que correspondre à une quantité d'acide carbonique décomposée par le carbone dans la cuve.

Le poids du carbone contenu dans l'acide carbonique décomposé étant égal au poids du carbone nécessaire pour effectuer cette décomposition, l'expression considérée représente le poids du carbone brûlé dans la cuve.

On suppose donc que tout le minerai est réduit par l'oxyde de carbone et que le carbone réagit après coup sur les produits gazeux de cette réduction.

La quantité d'acide carbonique produite par la réduction du minerai correspond à un poids de carbone égal à $\frac{3}{11}$ gc — p_2. La chaleur que dégage cette réaction est de 5600 calories par kilogramme de carbone.

Enfin, la quantité de carbone brûlé aux tuyères à l'état de CO est égale à $p_1 - p_3 - \left(\frac{9}{28} f + p_2 - \frac{3}{11} gc\right)$

On aura comme nouvelle valeur de Q qui devra être égale à celle précédemment trouvée :

$$Q = \left[p_1 - p_3 - \left(\frac{9}{28} f + p_2 - \frac{3}{11} gc\right)\right] \times 2473 + \left(\frac{9}{28} f + p_2 - \frac{3}{11} gc\right) \times 2473 + \left(\frac{3}{11} gc - p_2\right) \times 5600.$$

B. — *Quantité de chaleur fournie par le vent.* — Soient V le poids l'oxygène apporté par le vent; m, le poids d'oxygène fourni par le minerai et par l'acide carbonique de la castine. Si l'on exprime que le poids d'oxygène contenu dans les gaz est la somme des poids d'oxygène fournis par le vent et le lit de fusion, on aura :

$$\frac{4}{7} c + \frac{8}{11} gc = m + v$$

$$\text{D'où } v = \frac{4}{77} (44 + 56g) - m$$

Admettons que l'air pris à 12 ou 13° tient en moyenne 8 grammes d'eau par mètre cube pesant 1300 grammes. L'O contenu dans cette eau a donc un poids égal à 0,0055 du poids de l'air sec.

Soit z le poids de l'oxygène provenant de l'air sec. On aura :

$$z = 0{,}97677.v.$$

Poids de Az	3,33,z
Poids de l'air sec	4,33 × z
Poids de l'air humide	1,0062 × 4,33 × z.

Si T est la température du vent aux tuyères, la chaleur spécifique de l'air étant 0,239 la quantité de chaleur Q' apportée par le vent sera :

$$Q' = T \times 1{,}0062 \times 4{,}33{,}z \times 0{,}239.$$

II. — *Chaleur consommée dans le haut-fourneau.*

Il faut attribuer aux causes suivantes la perte de la chaleur effective dans le fourneau :

VAPORISATION de l'humidité de la charge.	CHALEUR SENSIBLE des gaz du gueulard.	RÉDUCTION du poids f de fer.	DÉCOMPOSITION de la castine.	RÉDUCTION des métalloïdes accompagnant C dans la fonte.	CHALEUR de fusion de la fonte et des laitiers.	DISSOCIATION de l'eau du vent.
Si t est la température des gaz du gueulard, q le poids d'eau à vaporiser, le nombre de calories cherché sera : $q\ [637+0,48\ (t-100)]$.	Les chaleurs spécifiques étant pour : Az . . 0,244 CO . 0,246 CO^2 . 0,216 Le nombre cherché sera : $t\ [3,35z \times 0,244 + c \times 0,2446 + gc \times 0,216]$.	La réduction de 1 kilogr. de fer de la combinaison Fe^2O^3 exige 2,000 calories.	La décomposition de 1 kilogr. de castine en CO^2 et CaO exige 424 calories.	Ph, Mn, Si et S étant respectivement dans le minerai à l'état de PhO^2, MnO^2, SiO^3 et acide sulfurique, la réduction de 1 kilogr. exige : Pour Ph. 5868 cal. — Mn. 2192 — — Si. 7828 — — S. 3238 —	La chaleur totale de la fonte varie selon sa nuance de 280 à 300 calories par kilog. Pour les laitiers elle varie suivant leur nature de 357 à 550 calories.	La dissociation de 1 kilog. de vapeur absorbe 3233 calories.

La chaleur de formation des laitiers n'a jamais été mesurée avec exactitude.

Les pertes par les parois ou par l'eau des tuyères ne peuvent se calculer que par différence.

Des mesures calorimétriques entreprises dans ce but ont toujours donné des chiffres trop faibles.

La mesure des hautes températures est la partie la plus délicate dans le contrôle de la marche du haut-fourneau ; le pyromètre thermo-électrique de M. *Le Châtelier* rendra dans ce cas de grands services.

Note B. — Centres de production des fontes en France.

Nous nous bornerons à quelques indications tout à fait générales.

I. — *Usines de l'Est.* — Avant la découverte de la déphosphoration des fontes la production de ces usines était fort limitée, les fontes phosphoreuses ne pouvant servir qu'à la fabrication des fers grossiers obtenus par le procédé du puddlage.

Depuis qu'on a su élaborer des aciers de bonne qualité en partant de fontes riches en phosphore, l'industrie sidérurgique a pris, dans la région Nancy, Briey et Longwy où se trouvent des gisements énormes de minerais impurs, un essor prodigieux.

Avec un minerai à très bas prix et exploité sur place et en utilisant les combustibles du Nord et de Belgique on a pu fabriquer la fonte dans des conditions exceptionnelles de bon marché.

.nt aux usines anciennes des Ardennes, de la Champagne et de la he-Comté exploitant les gisements de minerais purs du pays, elles .vent supporter la concurrence des nouvelles installations. Leur .rie si florissante autrefois a dû céder la place aux procédés nou- permettant d'arriver à des métaux utilisables avec des matières ères d'une valeur très faible.

— *Usines du Nord.* — Elles sont situées dans le bassin d'*Anzin* ou ɜon voisinage : les nombreux canaux du pays et le voisinage de · facilitent les arrivages des minerais de *Belgique*, du *Luxembourg*, *·raine*, etc... Il y a lieu de signaler toutefois que ces usines pro- ıt une bien moins grande quantité de fonte que celles de l'Est ; appareils métallurgiques, qui se perfectionnent de jour en jour, surtout employés à l'élaboration des fers et des aciers et aux reuses transformations mécaniques auxquelles ces métaux sont .s.

— *Usines du Centre.* — Les plus importantes usines du Centre :elles de *Montluçon*, de *Commentry-Fourchambault*, du *Creusot*, ıvirons de *Saint-Etienne* (Loire) et de *Lyon*.

ıées près de centres houillers considérables ou à une distance peu .ée de ces centres, ces usines commencent à se trouver pour la .ction des fontes dans une situation très défavorable par rapport es du Nord ou de l'Est, car, ou bien le minerai du pays est e, en petite quantité, difficile à traiter ou impur, ou bien celui es utilisent et qui est pur provient de gisements lointains : *Al- Espagne* ou *Pyrénées*.

ɜlques-unes d'entre elles ont renoncé au commerce des fontes, ne ɪuant avec un seul haut-fourneau ou avec un nombre très réduit ɜ appareils que la quantité de fonte nécessaire pour leur consom- n (*moulage*, *affinage*, etc...). Les fontes spéciales (ferro-manga- ferro-silicium, etc...) qu'elles utilisent dans l'élaboration des aciers viennent de l'étranger ou de quelques usines particulièrement ·ées en France à cette fabrication et parmi lesquelles nous avons :ité celle de Saint-Louis (Bouches-du-Rhône).

travail de forge, la fabrication des importantes pièces de machi- ɔur la marine, du matériel de guerre, etc..., en un mot, la produc- les aciers de premier choix semblent s'être concentrés aujourd'hui le bassin du Centre, les usines du Nord et de l'Est se consacrant

plutôt à la fabrication en grande masse, des fontes et des aciers de construction d'un usage courant.

Il n'en est pas moins probable que, dans un avenir peu éloigné, et avec la vulgarisation de plus en plus grande des procédés métallurgiques nouveaux, les usines du Centre ne lutteront que difficilement avec celles du Nord et de l'Est travaillant sur des matières premières d'un prix très peu élevé et munies d'un outillage très puissant.

Cette crise, tant redoutée depuis près de vingt années, n'a été reculée que grâce aux perfectionnements ininterrompus apportés à la fabrication sur l'initiative d'Ingénieurs hors de pair.

IV. — *Usines situées près de la mer.* — Ces usines, en nombre assez restreint, bénéficient de l'économie des transports de leurs matières premières.

Nous citerons les forges du *Boucau* près de l'embouchure de l'Adour, celles de *Saint-Nazaire* près de l'embouchure de la Loire et l'usine de *Saint-Louis* du Rhône ; ces établissements utilisent les minerais purs d'*Espagne* et ceux du bassin de la Méditerranée.

Tel est l'aperçu bien succinct que nous avons cru devoir donner sur l'industrie de la fonte dans notre pays. Il est sans doute insuffisant, mais le but même de notre Traité s'oppose au développement de toutes les questions ayant un caractère commercial.

TITRE II

LE FOUR A PUDDLER

FABRICATION DES MÉTAUX MISÉS OU SOUDÉS :

fers et aciers puddlés.

réduisant les minerais de fer, on ne peut isoler *le fer* qui constitue
tal principal, sans y laisser divers métalloïdes et une partie des
ux accessoires. Le produit de la réduction est *la fonte*, métal sus-
ble d'être employé brut à l'état de moulage selon sa qualité, mais
l'emploi principal consiste à être soumis à l'épuration pour four-
e fer ou l'acier.

PRÉLIMINAIRES — NOTIONS GÉNÉRALES SUR L'AFFINAGE

ant d'aborder l'étude des procédés d'affinage, il importe de donner,
éalable, quelques définitions et d'exposer les principes généraux
eur sont communs.

I. — *Qu'est-ce que l'affinage?*

ffinage est une opération qui a pour but d'epurer les métaux
: le métal brut dans la métallurgie du fer est la fonte. C'est par
ation qu'on provoque généralement l'élimination partielle on pres-
omplète des éléments étrangers accompagnant le fer dans la fonte.
pendant l'oxydation peut ne pas être l'unique action déterminant
age. Si l'on admet qu'on dispose déjà de fers et d'aciers de qua-
déterminées obtenus par un procédé quelconque, on conçoit qu'en
ant la fusion simultanée de ces métaux avec une quantité donnée
nte, on puisse répartir les éléments étrangers de cette fonte dans
plus grande masse ferreuse et en diminuer par suite la proportion
la masse métallique totale.
: sera une sorte d'affinage indirect dans lequel cependant inter-

viendra l'action oxydante dans une certaine mesure, comme nous le verrons.

Supposons néanmoins que l'affinage ne soit dû qu'à une action oxydante, action qui domine dans le plus grand nombre des méthodes et qui est rarement exclue dans les autres.

II. — *Les agents oxydants.*

Le principal agent d'oxydation est l'oxygène de l'air qui se combine directement à la plupart des corps, pourvu que la température soit assez élevée.

Certains oxydes métalliques facilement décomposables peuvent servir comme source d'oxygène, ceux de fer notamment. Qu'ils soient ajoutés au début ou en cours de travail ou qu'ils se forment par l'action oxydante de l'air à la surface du métal à affiner, ils servent de véhicule à l'oxygène de l'atmosphère pour le faire pénétrer dans la masse métallique, d'après un mécanisme que nous expliquerons.

III. — *Produits de l'oxydation.*

L'affinage se réalisant par oxydation est par suite toujours accompagné d'un déchet : ce déchet se produit soit à l'état plus ou moins liquide ou pâteux, soit à l'état gazeux et le plus souvent dans une même opération à ces deux états à la fois. Il est même presque impossible d'éviter que le métal principal, *le fer*, ne figure pas pour une certaine part dans ce déchet.

Le déchet liquide (*ou mieux, à des degrés divers de fluidité*) est constitué par les *scories* et les *laitiers* : les scories sont des silicates retenant plus particulièrement des oxydes métalliques ; on réserve le nom de laitiers aux silicates contenant surtout des bases terreuses.

Au haut-fourneau, les impuretés s'éliminent à l'état de laitiers, car les éléments terreux y dominent ; dans les procédés d'affinage, le déchet liquide est surtout constitué par des scories, quelquefois par des laitiers.

Les scories ont parfois un rôle utile ou nuisible dans l'appareil d'élaboration qui les a engendrées. On les utilise souvent dans d'autres appareils métallurgiques.

Les laitiers d'affinage sont aussi quelquefois utilisés, même pour des usages étrangers à l'art sidérurgique.

.es *déchets gazeux* se répandent souvent dans l'atmosphère, sans isation, ou sont réunis à ceux qui proviennent de la chauffe du four ır des chauffages accessoires avant de passer à la cheminée. Dans anciens procédés, C et S étaient à peu près les seuls corps dont mination pût se faire sous forme de gaz; avec les hautes tempé- ıres des méthodes actuelles, S, Mn et le fer lui-même peuvent se ıtiliser partiellement à la fin de l'opération.

IV. — *Mécanisme de l'affinage par oxydation.*

ıupposons un bain de fonte fondue dans un bassin peu profond, par mple, et exposée là à l'action oxydante de l'air.

.es éléments les plus avides d'oxygène absorbent directement ce ; ces éléments seront, rangés dans l'ordre d'oxydabilité, le silicium, nanganèse, le phosphore, le carbone, etc...

:ependant l'oxygène se portera aussi, et souvent de préférence, à se de l'influence des masses, sur le métal *dominant;* l'oxydation de dernier, vu son contact mieux assuré avec l'air, sera plus facile. te oxydation du métal principal sera, d'ailleurs, d'autant plus éner- ue que le courant d'air sera plus rapide et plus abondant. Mais cette 'dation n'est jusqu'à un certain point que *temporaire.*

\ mesure que le métal principal absorbe O en se transformant en *ıde supérieur*, celui-ci le cède aux éléments plus oxydables qui se uvent disséminés dans le bain métallique en étant ramené à l'état protoxyde,

Le métal dominant, le fer, ne sert donc, en quelque sorte, que de ıicule pour transporter l'oxygène de l'air aux éléments étrangers 'il s'agit d'éliminer.

Il suit de là qu'on peut hâter l'épuration et diminuer le déchet, en ·lant au métal une certaine dose de l'oxyde en question ou de sili- tes de fer basiques, pour les raisons exposées ci-dessous.

Pour que cette réaction se produise, il faudra assurer un contact time entre l'oxyde du métal et les éléments à éliminer.

Or, l'oxyde étant plus léger que le métal reste, en général, à la ırface du bain surtout quand il peut se former un silicate, ce qui rrive dans le cas de l'affinage de la fonte ou quand on opère dans un ourneau à parois siliceuses *(briques ordinaires, quartz*, etc...)

Ce n'est donc pas par l'action directe des oxydes supérieurs du fer

que se fait surtout l'oxydation du bain, mais par l'action des silicates de fer. Dès que le silicium aura pu s'oxyder, la silice formée saturera les oxydes supérieurs facilement réductibles, empêchera leur action sur les éléments plus oxydables tels que Mn, Ph, C, etc... Ce n'est que lorsque la formation de la silice sera arrêtée et que, sous l'action continue de l'atmosphère du bain, les silicates se surchargeront en ces oxydes en devenant basiques (1), que l'affinage pourra continuer.

Il y aura donc oxydation permanente du métal brut par les oxydes supérieurs de fer tenus en suspension par les silicates basiques; ces oxydes, à leur tour, se réoxyderont à l'air, rendant plus basiques les silicates qui les tiennent en suspension; et ainsi de suite.

On voit, par suite, que, pour assurer un bon affinage, on pourra être amené à *brasser activement* la masse, car la fonte s'affinant se rapprochera de plus en plus du fer dont le point de fusion est plus élevé. Le foyer utilisé pourra, en effet, ne pas fournir l'appoint de chaleur nécessaire pour maintenir dans un état de fluidité suffisante la fonte qui a commencé à s'affiner, tout en maintenant beaucoup plus fluides les scories dont le point de fusion est plus bas. Ce brassage pourra ne pas être effectué à main d'homme ou mécaniquement, si l'air est lancé sous pression à travers le bain de fonte en fusion. En même temps qu'il oxydera, cet air accomplira le brassage. C'est, en effet, ce qui caractérise un des procédés d'affinage.

Il faudra aussi éviter l'excès de silice dans le bain de fonte soumis à l'affinage, car, avec excès de silice, les silicates restent longtemps acides; l'oxydation par la scorie sera retardée d'autant; par suite, l'affinage deviendra plus onéreux. Nous verrons, plus tard, combien cet excès de silice est nuisible quand on veut débarrasser la fonte d'éléments étrangers donnant par l'affinage des oxydes que la silice déplace de leurs combinaisons avec les bases. On conçoit, en effet, que, dans ce cas, l'élimination de ces éléments puisse être rendue impossible si, une fois libres, leurs oxydes sont réductibles par le CO qui se formera lors de la décarburation.

(1) Il ne faut pas oublier que la silice paraît se combiner avec les bases en proportions indéterminées.

CHAPITRE Ier

OCÉDÉS D'ÉLABORATION PRODUISANT LE MÉTAL A L'ÉTAT PATEUX

ARTICLE 1er. — APERÇU GÉNÉRAL

procédés d'affinage peuvent se diviser en deux grandes classes, ne considère que l'état sous lequel est produit le métal en fin ration.

ıs la 1re classe, nous comprendrons ceux dans lesquels le métal est u à l'*état pâteux*, mélangé plus ou moins intimement avec les ·etés. Ils constituent les procédés anciens en partie abandonnés, dont certains ont encore une importance considérable, tant en ıêmes que comme auxiliaires des procédés nouveaux.

ıs la 2e classe, nous comprendrons ceux dans lesquels la tempé- : est suffisante pour que le métal produit soit obtenu à l'état e, ses impuretés également liquides et de densité différente s'en ınt par liquation dans l'appareil même d'élaboration. Ils cons- t les procédés actuels dont l'origine remonte à une quarantaine ées environ.

cier fondu au creuset est cependant d'origine beaucoup plus an- :, mais ce n'est que dans cette dernière période qu'on a pu per- ınner sa fabrication et étendre, d'une façon remarquable, la série 'ois si restreinte des métaux ferreux que ce procédé pouvait pro-

ıs nous occuperons d'abord des procédés d'élaboration produisant tal à l'état pâteux.

métal ainsi obtenu se présente sous forme d'éponge métallique tuée par des grumeaux de fer ou d'acier assez ramollis pour pou- e souder grossièrement entre eux et contenant dans leurs ins- :es les scories à l'état plus ou moins fluide.

: scories liquides seront expulsées de la masse ferreuse ou acié- par l'opération du *cinglage* consistant à exercer sur cette masse ction de *pression* ou de *percussion*. Ce cinglage accompli par des :s ou des marteaux n'expulsera que fort imparfaitement les sco-

ries qui, supposées très fluides au début même de l'opération, deviendront de plus en plus visqueuses vers la fin.

La loupe ainsi cinglée et transformée par ce travail est un parallélipipède plus ou moins régulier, appelé *massiau* ou *lopin* selon ses dimensions, contenant toujours, interposées dans sa masse, des particules scoriacées.

De là, la nécessité de faire subir au massiau le *corroyage* qui comprend l'ensemble des opérations accessoires destinées à achever son épuration. Ce corroyage est une sorte de travail mécanique subi par le massiau porté à haute température et dont le détail sera donné plus loin.

La fonte soumise à l'affinage devra être portée à une température élevée pour que les réactions puissent s'accomplir. Or, selon que le combustible destiné à fournir la chaleur nécessaire sera mélangé avec la fonte ou en sera nettement séparé, on pourra distinguer dans les procédés de cette 1re classe : *l'affinage au bas foyer et l'affinage au four à reverbère ou puddlage* (1).

Article 2. — Affinage au bas-foyer

Nous ne pouvons donner ici qu'une idée générale sur ce procédé d'affinage, aujourd'hui presque abandonné, mais pratiqué encore néanmoins dans certains pays d'une façon courante parce que les minerais y sont très purs et le combustible végétal à bon marché.

A. — *Appréciation du procédé.* — Le bas-foyer, à quelques perfectionnements près, est le même appareil qui servait autrefois à la production du fer pour le traitement direct du minerai au contact du combustible.

La fonte est fondue au contact du combustible solide et exposée ensuite à l'action fortement oxydante d'un jet d'air atmosphérique lancé par des tuyères.

Cette méthode était celle qui fut exclusivement employée jusqu'à la fin du siècle dernier; elle est encore pratiquée mais elle tend de plus en plus à être abandonnée pour les raisons suivantes :

1° Elle ne permet pas toujours l'élimination régulière et complète

(1) De « to puddle, brasser, réunir ».

:ontenu dans la fonte ; l'affinité du combustible pour la fonte
;e au but qu'on veut atteindre, l'habileté de l'ouvrier joue un
rôle dans ce procédé puisqu'il a à s'opposer à chaque instant à
rburation.
qu'il soit plus aisé d'obtenir par ce procédé des fers légèrement
x, il n'en est pas moins vrai qu'on peut y fabriquer aussi des
'une très grande ductilité : les scories y sont très fluides, la
ature très élevée ; l'essentiel pour l'ouvrier sera d'empêcher le
;tible de défaire ce qu'a réalisé l'atmosphère oxydante.
a méthode est coûteuse par suite de l'emploi forcé du charbon
; comme combustible ; les houilles et le coke renfermant toujours
fre en proportion assez forte pour influer sur la qualité du fer
quel ils seraient en contact. En outre, le combustible minéral, à
le la nature argileuse de ses cendres et de leur abondance, rend
;ibles et pâteuses les scories que le cinglage serait impuissant à
:r.
méthode est coûteuse, elle possède cependant l'avantage d'as-
a disparition des impuretés par suite de la grande perte de fer
:compagne en pratique. Le fer ainsi obtenu dit « *fer au bois* »
;uand il vient de Suède notamment, d'une réputation de pureté
ıent justifiée.
le ne permet de traiter à la fois qu'une quantité relativement
lu métal, de 30 à 150 kilos, suivant les variantes de la méthode.

– *Description du foyer.* — Le creuset est construit avec des
; de fonte et comprend un espace à peu près rectangulaire.
:ienne sole en grès fut vite remplacée par une plaque en fonte
10 m. d'épaisseur qui résista mieux aux corrosions.
ppelle *warme* la plaque qui supporte la ou les tuyères, *haire* ou
celle qui est opposée à la face de travail, *contrevent* celle qui
osée à la tuyère.
laque de travail est horizontale et s'appuie sur une plaque ver-
lite *de chio* opposée à la rustine, dans laquelle on ménage un ou
rs trous destinés à livrer passage aux scories. — Les feux d'af-
furent d'abord découverts puis disposés sous de vastes cheminées
ı partie inférieure terminée en hotte couvrait 4 à 5 mètres carrés.
;truisit ensuite des feux couverts, en entourant le creuset d'une
xe en maçonnerie réfractaire, à parois verticales, supportant une

voûte pourvue d'une ouverture pour le passage des gaz chauds. Deux des parois verticales étaient munies d'ouvertures, soit pour le travail, soit pour le chargement.

Pour fabriquer de l'acier on modère l'action oxydante, on traite des

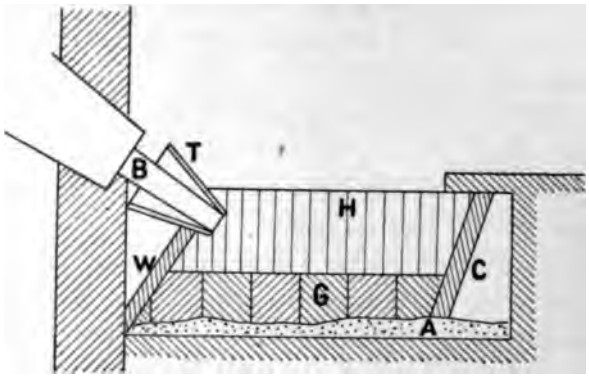


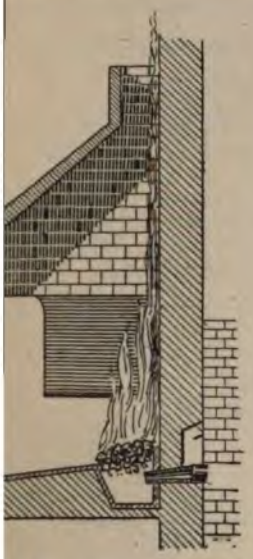
Fig. 68. — Ancien feu d'affinerie à Siegen (Prusse).

A, Argile. — *B*, Buse. — *C*, Contre-vent. — *G*, Grès réfractaire (ancienne sole). — *H*, Haire ou rustine. — *W*, Warme. — *T*, Tuyère.

fontes se prêtant le mieux à la formation des scories bien liquides préservant le métal contre une oxydation trop rapide; si besoin est, on ajoute des battitures, etc... Sous cette nappe protectrice, l'ouvrier pourra mieux conduire à sa guise et d'une façon progressive la décarburation partielle à laquelle il veut arriver.

Les deux éléments qui influent le plus sur l'activité de l'affinage sont la *profondeur du foyer* et *l'inclinaison des tuyères*. Dès que le foyer est profond et la tuyère peu plongeante, le métal fondu occupant le fond du foyer est plus ou moins soustrait à l'action oxydante du vent; l'affinage est alors lent et souvent incomplet. Au contraire, une faible profondeur associée à un vent fort et plongeant favorise l'oxydation. De très faibles changements, sous ce double rapport, peuvent notablement modifier la marche de l'opération. Nous ne décrirons pas le travail au bas foyer, nous contentant de dire qu'il comprend deux périodes : la fusion de la fonte chargée dans le foyer en même temps que des battitures et des scories riches en oxydes de fer pour hâter l'oxydation et l'affinage proprement dit. Les méthodes d'affinage au bas-foyer, variables d'une région à une autre, portaient ordinairement le nom des régions où on les exploitait. — Incidemment, signalons le dispositif employé

xtraire directement le fer du minerai sans passer par la fonte. *Catalogne* et dans les *Pyrénées* où le bois est abondant, on traite quelquefois directement le minerai pour obtenir non de la fonte u fer. Le fourneau catalan employé pour cette opération est un creuset carré construit dans un four en maçonnerie. Une fois le creuset rempli



. 69. — Feu comtois.

Fig. 70. — Foyer catalan.
C, Combustible. — *F*, Foyer. — *T*, Tuyère. — *L*, Loupe.

rbon de bois bien allumé, on place au-dessus deux tas juxta- de minerai et de charbon et l'on fait arriver un fort courant ar une tuyère. Le charbon brûlant sous le vent de la tuyère de l'acide carbonique qui, au contact de l'excès de charbon, à l'état d'oxyde de carbone. Cet oxyde de carbone traverse le i, le réduit à l'état de fer métallique en repassant lui-même à l'acide carbonique. Une certaine quantité d'oxyde de fer se com- vec l'argile du minerai pour former un laitier composé de silicate d'alumine et de fer très fusible.

er rassemblé dans le creuset sous forme spongieuse est placé e enclume et frappé par un marteau qui lui donne de la com- et le débarrasse du reste du laitier.

—*Du finage ou mazéage précédant l'affinage de la fonte au bas-foyer.* quelques-unes des méthodes précédentes, on pratiquait souvent age en deux temps en se servant de deux foyers distincts.

On opérait dans l'un d'eux le *finage* ou *mazéage* : cette opération était toujours une fusion oxydante peu prolongée, de façon à transformer certaines qualités de fontes grises, riches en silicium, en fontes blanches ou truitées, se transformant plus aisément en fer. On brûlait simplement la plus grande partie du silicium, élément le plus oxydable, un peu de manganèse et de phosphore, éléments marchant après le silicium dans l'ordre d'oxydabilité.

Les analyses suivantes d'une opération de mazéage, mettent bien en évidence l'oxydation presque complète du silicium, dès le début.

MÉTAL	C	Si
Fonte initiale.	3,886	1,255
Après fusion	3,510	0,575
10′ après fusion . . .	3,707	0,478
20′ — . . .	3,644	0,273
28′ — . . .	3,544	0,154
Métal mazé	3,342	8,130

Dans un autre foyer, on finissait l'affinage.

Aujourd'hui le *mazéage* ou *finage* a presque complètement disparu, car, vu le prix de revient, on ne traite plus dans les bas-foyers existants que des fontes assez pures destinées à donner des produits de choix.

Article 3. — Affinage au four a reverbère ou puddlage

L'affinage au charbon de bois était onéreux : aussi, quand ce combustible devint rare, dut-on chercher à le remplacer par le coke qu'on avait déjà réussi à employer dans les hauts-fourneaux.

a) Invention d'Henry Cort en 1784. — Henry Cort parvint, en 1784, après beaucoup d'essais infructueux, à affiner la fonte par le coke ou à l'aide de la houille seule. Son procédé porte le nom de *méthode d'affinage anglaise ou puddlage* ; il consiste à employer un four dans lequel il n'y a pas contact immédiat entre le combustible solide et le métal traité.

Par ce moyen, on n'a plus à craindre l'action recarburante du char-

on, ni l'influence du soufre contenu dans tout combustible minéral.

Le traitement est, en outre, simplifié puisqu'il n'exige pas le vent.

Cette invention eut une portée considérable au point de vue de la roduction des métaux ferreux.

Le four choisi par *Cort* fut un des types de fours à foyer indépen-ant : c'est ce qu'on appelle un four à *reverbère*.

Ce four comprend trois parties : le *foyer* à grille avec son cendrier

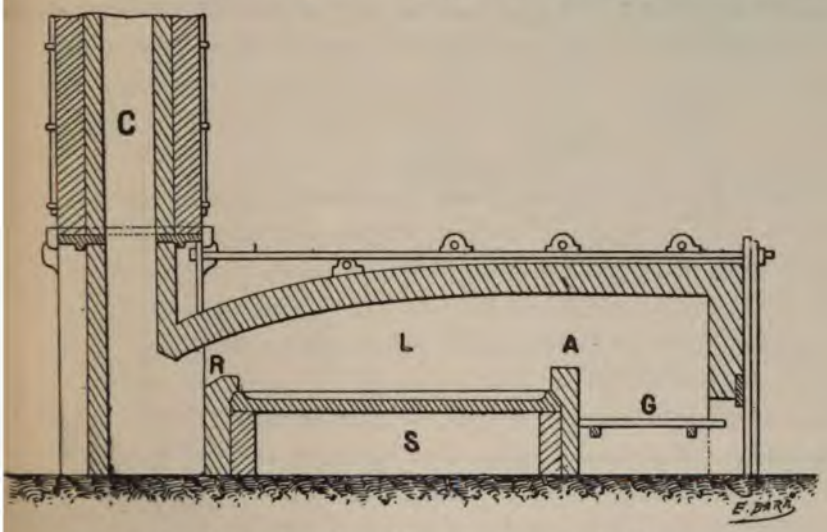


Fig. 71. — Four de puddlage simple ; vue de côté.
A, Autel. — *C*, Cheminée. — *G*, Grille. — *L*, Laboratoire. — *R*, Rampant. — *S*, Sole.

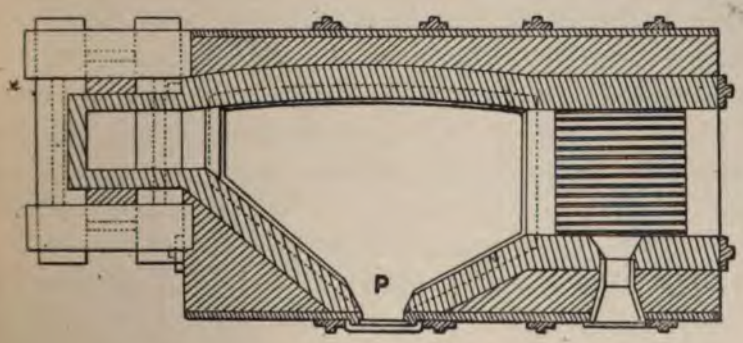


Fig. 72. — Four de puddlage simple ; vue de face.
P, Porte de travail.

constituant la source de chaleur, le *laboratoire* succède au foyer ; c'est le four proprement dit, sa partie plane est appelée *sole* ; c'est sur la

sole qu'on place la fonte, elle est séparée du foyer par une espèce de murette appelée *pont* ou *autel*.

Une voûte unique peu élevée couvre le foyer et le laboratoire.

La cheminée provoque le tirage en évacuant les produits de la combustion. Le conduit parcouru par les gaz allant à la cheminée s'appelle *le rampant*.

Le four à puddler était construit en briques réfractaires, la sole sur laquelle s'effectuait l'affinage était en sable argileux battu.

b) Inconvénients de la sole en sable de Cort. — C'est ce simple détail d'une sole en sable qui a rendu défectueux les premiers résultats de l'affinage de la fonte au four à puddler.

Avec une sole en sable, la silice s'emparait de l'oxyde de fer au fur et à mesure de son addition sous forme de battitures, ou de sa formation aux dépens de la fonte par l'atmosphère oxydante du four. L'oxyde de fer ainsi transformé en silicate neutre ou acide (*proto ou bisilicate*) n'a plus alors aucune action sur les divers éléments de la fonte. Si le carbone et le soufre peuvent, à la rigueur, être partiellement éliminés par l'influence directe de l'air, parce que les composés oxydés de ces deux corps sont gazeux, il n'en est plus de même du silicium et du phosphore qui réclament, pour être oxydés d'une façon permanente, la présence d'une base forte non encore oxydée par la silice. Les fontes obtenues en Angleterre par la réduction au coke des minerais houillers étant toujours plus ou moins phosphoreuses et siliceuses, ne pouvaient donner, dès lors, que de mauvais fers par le puddlage *direct sur sable*.

c) Cort doit procéder à une épuration préalable avant de puddler. — Il fallut pour avoir des produits, même passables, les soumettre à une épuration préalable, au finage, dans un bas-foyer.

En réalité, l'affinage de la fonte de fer se composait alors dans les forges anglaises de trois opérations distinctes :

Le *finage*,
Le *puddlage*,
Le *corroyage*.

Le *finage* pratiqué au bas-foyer, plus ou moins perfectionné, enlevait la majeure partie de Si et de Mn et une proportion d'autant plus considérable de Ph que les scories étaient plus basiques. Il ne faut pas oublier que l'acide phosphorique formé pouvait alors passer aux scories,

ce à leur grande basicité et à l'absence de silice dans les parois, squ'elles sont toutes constituées dans les bas-foyers par des plaques fonte.

Avec la sole en sable, la silice de la paroi réagissait sur l'acide phosorique formé en le déplaçant s combinaisons qu'il avait rmées en s'unissant aux oxys métalliques du bain.

Lorsque le carbone brûlait, cide phosphorique était réit et le phosphore se réincorrait au bain.

On ne se rendait pas compte cette époque du mécanisme l'opération, mais on constait bien le fait lui-même.

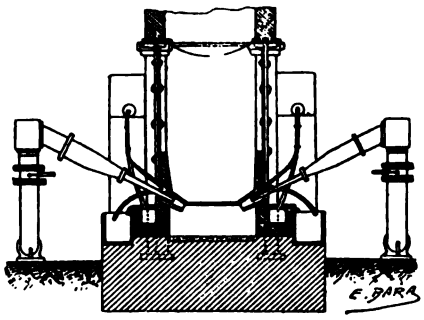


Fig. 73. — Feu de finerie anglais à six tuyères.

Le *puddlage* achevait l'affinage du *fine-metal* et le *corroyage* expulit les scories retenues par la loupe.

La méthode d'affinage anglaise n'a pénétré en France qu'assez lentent. Adoptée au commencement du siècle, au Creusot, elle n'était core employée, en 1819, dans son ensemble, que dans cette usine.

d) Samuel Baldwin Rogers propose, en 1818, une sole en fonte. — emploi des soles en fonte paraît avoir été proposé par Samuel ldwin Rogers dès 1818, mais elles ne furent réellement adoptées e dès 1830.

En 1825, on essaye de remplacer le sable formant la sole par des ories fortement battues sur un massif de briques, mais ces scories ndaient et attaquaient la brique.

En 1829, on constate, çà et là, des soles en fonte, mais il semble quis qu'en puddlant directement sur la fonte (*sans couche de menues railles ou de scories*) les résultats sont défectueux.

Pour prévenir la corrosion de la sole, on la refroidit par l'air qu'on soin de laisser circuler au-dessous d'elle.

En 1837, toutes les usines adoptent la sole en fonte recouverte de ories avec refroidissement par l'air circulant sous la sole.

e) Perfectionnements successifs du four à puddler. — Il fallait faire pas de plus. Les briques des parois du laboratoire agissent comme lles de la sole sur la fonte à affiner : on remplaça les briques infé-

rieures des parois latérales par des plaques de fonte convenablen

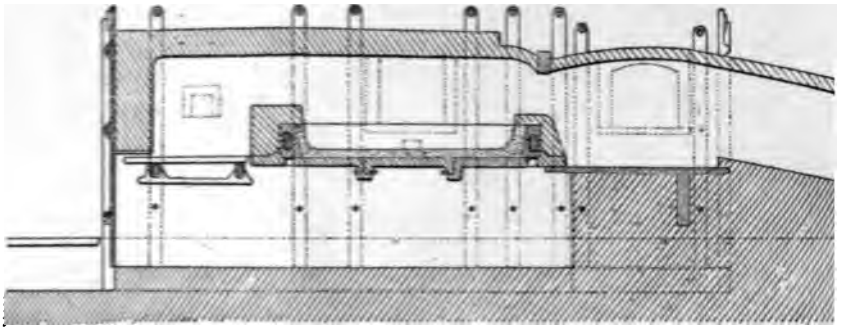


Fig. 74. — Four de puddlage avec courant d'eau.

refroidies, soit par un courant d'air ou d'eau, soit encore par un d'eau agissant par évaporation. Ces plaques latérales furent prot

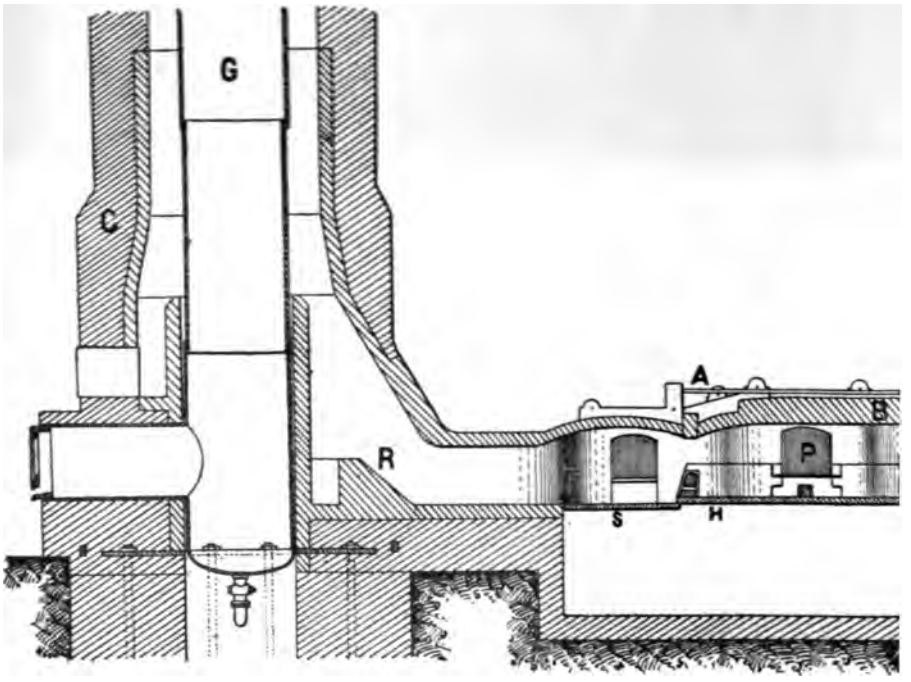


Fig. 75. — Four à puddler avec chaudière verticale. — Coupe longitudina

A, Armature en fonte. — *B*, Maçonnerie en briques. — *C*, Cheminée. — *F* ture en fer. — *G*, Chaudière verticale chauffée par les flammes perdues et dont la peut servir à actionner les laminoirs de puddlage, cisailles, pilons, etc. — *H*, de fonte supportant les oxydes de fer. — *P*, Porte de travail. — *R*, Rampant. — auxiliaire pour chauffer les gueuses de fonte. — G, Grille.

par un cordon ferrugineux (*minerai riche, oxyde artificiel*) ou calcaire.

Quand la masse d'eau est abondante et ne se transforme pas en vapeur, les plaques latérales sont remplacées par de fortes poutres creuses en fonte qu'il faut constamment maintenir pleines d'eau.

C'est un mode de réfrigération énergique, mais non sans danger, à cause des fuites qui peuvent se produire sous l'influence des brusques changements de température.

Le puddlage étant une opération coûteuse par la dépense de combustible qu'elle occasionne, on a cherché à compléter les fours par des dispositions spéciales permettant d'utiliser la chaleur perdue pendant l'affinage proprement dit.

Une disposition assez généralement adoptée consiste à faire suivre le four à reverbère dans lequel s'opère cet affinage par une sole plus petite, sur laquelle sont portés au rouge les gueusets de fonte qui doivent servir à l'opération suivante.

De plus, les flammes qui ont passé sur ces gueusets sont fréquemment employées à chauffer des chaudières à vapeur : ces chaudières sont généralement verticales, mais il en est aussi d'horizontales et elles sont même quelquefois placées au-dessus du four.

Quant aux perfectionnements apportés au mode de chauffage, ils seront étudiés ultérieurement à propos des fours Siemens. Il importe, toutefois, de signaler, dès maintenant, que le chauffage avec foyer à grille et à la houille est le plus répandu.

CHAPITRE II

PRATIQUE DU PUDDLAGE

On peut, d'après la nature des fontes traitées et celle des produits, distinguer deux sortes de puddlage :

Ce sont le puddlage ordinaire, *sec ou froid*, et le puddlage *gras, chaud ou bouillant* (boiling-process).

a) Puddlage sec ou maigre. — C'est le procédé primitif dans lequel on affine la fonte sans la réduire à l'état liquide, mais en la chauffant de façon à la diviser en grumeaux pâteux qu'on brasse à l'aide d'un

ringard en l'exposant à l'action de la flamme jusqu'à ce que le fer ait pris nature.

Ce puddlage s'effectue dans un four à réverbère ordinaire à sole en fonte, cette sole est recouverte d'une couche de ferraille et de scories ferrugineuses de 5 à 7 cm. d'épaisseur et a ses parois latérales en briques plus ou moins protégées par un cordon ferrugineux ou calcaire.

Les matières ferrugineuses recouvrant la sole et les parois sont comprimées et rendues unies à l'aide d'une *spadelle*, à la suite d'un vif coup de feu au blanc soudant.

Ce puddlage est le procédé primitif, celui que l'on pratiquait jadis sur les fontes *mazées* à la suite du finage au bas-foyer et que l'on pourrait appliquer encore aujourd'hui pour produire des fers communs, en traitant des fontes blanches peu carburées et surtout peu siliceuses. Nous ne l'étudierons pas.

b) Puddlage gras, chaud ou bouillant. — La fonte est amenée à l'état liquide et affinée par brassage très énergique avec des matières décarburantes : scories ou crasses riches en oxyde de fer. Ce procédé est moins rapide et plus coûteux que le précédent, mais il permet de traiter directement les fontes grises ou les fontes blanches très carburées sans avoir besoin de leur faire subir l'opération du *mazéage*.

L'opération doit s'effectuer dans un four à sole avec parois énergiquement refroidies, du type de ceux dont on a donné plus haut la description.

Nous décrirons seulement la marche de l'opération du puddlage gras; celle du puddlage sec n'en différant pas essentiellement.

Article 1er. — Marche générale d'une opération de puddlage

L'opération comprend quatre périodes qui sont :

Le chargement et la fusion ;
Le brassage ;
La confection des loupes ;
La transformation de la loupe en fer brut.

A. — *Chargement et fusion.* — Quand le four est chaud, on y introduit 200 à 250 kilos de fonte sous forme de blocs ou *gueusets* pesant chacun 25 à 30 kilos. On charge en même temps des battitures et des

s en quantité d'autant plus grande que la fonte traitée est
e et plus impure.
ment effectué, on ferme la porte de travail et l'on cherche
: plus rapidement possible la fusion des matières dans le
ela, l'ouvrier pousse le feu et ouvre le clapet de la cheminée
ctiver le tirage. Le chauffage est poussé jusqu'à ce que la
:cories soient amenées à l'état liquide.
de la fusion dépend : de la nature de la fonte, de celle du
de la construction du four.
de 30 à 40 minutes.

ssage. — Pour opérer le brassage, on n'ouvre pas la porte
le-même. L'ouvrier éprouverait une chaleur trop vive et le
ne serait refroidi.
employé. — On introduit un fort ringard courbé à angle
ne de ses extrémités, appelé *crochet*, par une
rture carrée de 0^m10 à 0^m15 de côté prati-
: bas de la porte mobile et facile à clore à l'aide
plaque, en dehors des moments où l'ouvrier
ı charge.
et ne peut pas servir plus de 5 minutes, parce
de ce temps, l'extrémité par laquelle l'ouvrier
e est déjà trop chaude pour qu'on puisse con-
enir à la main et l'autre extrémité qui plonge
ı de fonte, ayant atteint le rouge blanc, n'offre
e rigidité pour permettre le brassage du métal.
ıc, toutes les cinq minutes, plonger dans l'eau le
on vient de se servir pour le refroidir et conti-
ssage avec un autre crochet. Aussi, le nombre
employés pour effectuer le brassage permet-il
la durée de cette période qui varie de quatre
ıit crochets.
du brassage. — Après la fusion, on a donc
luide de 2 à 3 cm. d'épaisseur comprise entre
ée solide du four et la couche de 1 à 2 cm. de
ısion placée au-dessus. L'action de ces deux
ées, entre lesquelles se trouve la fonte, suffit pour la trans-
er ou en acier, pourvu qu'on établisse entre la fonte et la

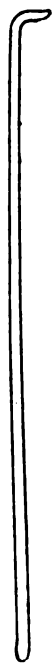


Fig. 76.

couche de scories qui surnage un contact suffisant. L'affinage durera d'autant moins longtemps et le métal produit sera d'autant plus homogène que le brassage sera plus actif, c'est-à-dire qu'on mélangera mieux la fonte à laquelle il faut de l'oxygène et les matières qui doivent le fournir.

Nous avons expliqué, lorsque nous avons traité de l'affinage en géné-

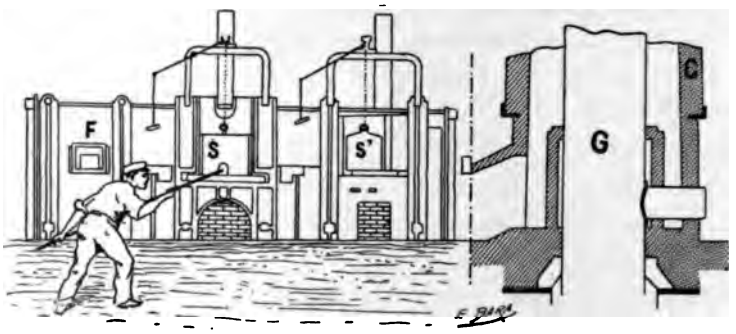


Fig. 76. — Four à puddler.

F, Four à grille. — *G*, chaudière. — *S*, porte de travail correspondant à la sole du four à puddler. — *S'* Porte de travail correspondant à la sole de réchauffage des gueusets. — *C*, Cheminée.

ral, par quel mécanisme spécial on pensait que l'oxydation des éléments étrangers contenus dans la fonte devait s'accomplir.

Nous n'avons pas spécifié alors quels étaient les oxydes supérieurs du fer qui, passant à l'état d'oxydes inférieurs, parvenaient à réaliser l'affinage par cession de leur oxygène. Il paraît probable que ce n'est ni à Fe^3O^4, ni à Fe^2O^3, qu'il y a lieu d'attribuer exclusivement ce rôle de véhicule de l'oxygène mais à ces deux oxydes à la fois, sans qu'on sache bien exactement quelle est la part à attribuer à chacun d'eux dans leur action oxydante.

Quoi qu'il en soit, ces oxydes supérieurs seront ramenés à l'état de protoxyde en cédant de l'oxygène aux substances contenues dans la fonte, d'après leur ordre d'oxydabilité.

a) **Période de scorification** (1). — Le silicium et le manganèse sont oxydés d'abord, ensuite le phosphore. Cette phase du brassage est tranquille, elle est caractérisée par le passage à la scorie de la silice, des oxydes de manganèse et de l'acide phosphorique.

Il se forme des silicates d'abord acides, puis neutres et basiques :

(1) Voir le Traité de métallurgie de Gruner pour la théorie **complète** de l'affinage.

silicates de fer et de manganèse. Les phosphates de fer et de manganèse se forment ensuite.

La scorie devient d'autant plus fluide qu'elle est plus riche en oxyde de manganèse et en acide phosphorique : nous verrons plus loin combien il peut être utile qu'il en soit ainsi.

A la fin de cette période de scorification l'ouvrier, s'aidant de son crochet, pourra faire écouler une partie des scories par l'orifice de la porte de travail quand la fonte à affiner sera phosphoreuse.

Il éliminera ainsi une certaine proportion des phosphates formés et les soustraira à l'action réductrice ultérieure de CO qui se produira lors de la décarburation. Sinon, le phosphore de la fonte se retrouverait intégralement dans le métal affiné.

A cette phase tranquille, dite de *scorification*, succède une phase agitée, celle de la décarburation.

b) **Période de décarburation.** — Le carbone brûle à son tour en passant à l'état de CO et CO^2. Quand la décarburation commence à se produire, le bain foisonne, monte et tend à bouillonner. Les bulles de gaz soulèvent la masse, des jets de flammes sortent du bain. Les scories fondues s'élèvent jusqu'à 0^m30 au-dessus de la sole et atteignent souvent le trou de la porte de travail par où elles coulent hors du four. L'ouvrier doit même en favoriser la sortie dans le cas où elles sont phosphoreuses pour la raison donnée plus haut.

A mesure que le carbone disparaît, il faut élever la température afin de maintenir le métal en fusion aussi longtemps que possible, et cela pour pouvoir continuer jusqu'au bout l'action affinante.

Il arrive cependant un moment où le fer, plus ou moins décarburé, se fige en grumeaux pâteux qui bientôt peuvent se souder les uns aux autres. Le brassage cesse alors d'être possible.

La durée du brassage dépend beaucoup de la nature de la fonte, elle varie de 30 à 40 minutes environ sans qu'on puisse fixer des nombres bien précis à cet égard.

Le fer forme un amas spongieux s'élevant de la sole en forme de choux-fleurs d'un blanc étincelant qui contraste avec la masse rouge et l'aspect huileux de la scorie qui retombe immobile sur la sole du four. A ce moment, on ne voit plus que de rares bulles autour des masses figées dont le pied seul reste plongé dans le bain de scories.

C. — *Confection des loupes.* — Dès que le fer s'est ainsi solidifié, il

faut se hâter de faire les *loupes ou balles* et de baisser le clapet de la cheminée, sinon le fer perdrait tout son carbone et le déchet croîtrait rapidement à cause de l'oxydation du fer.

L'ouvrier divise la masse ferreuse suffisamment ramollie en cinq ou six *loupes* ou *balles* qu'il arrondit et comprime successivement avec son crochet pour en compléter le soudage et en chasser le plus possible la scorie. Il ne doit pas mettre plus de 10 à 12 minutes pour confectionner les loupes.

Une loupe pèse de 30 à 40 kilos.

D. — *Transformation de la loupe en fer brut.* — Dès qu'une loupe est achevée, l'ouvrier l'extrait du four avec des tenailles en ouvrant la porte de travail et la dépose sur une sorte de brouette métallique.

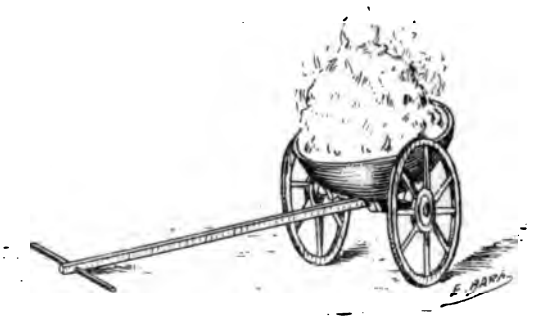


Fig. 77. — Loupe.

La loupe sortant du four à puddler se présente sous forme d'une masse spongieuse d'une forme irrégulière et fortement imprégnée de scories. On désigne sous le nom de *cinglage* l'opération qui, tout en expulsant la scorie, donne à la loupe une forme à peu près géométrique, facilitant son emploi dans les opérations ultérieures. Le cinglage peut être opéré par pression (*presses et cingleurs rotateurs*) et plus généralement par percussion (*marteau-pilon*). La loupe après cinglage est transformée en *massiau*, bloc parallélipipédique de 30 à 40 cm. de long, avec une section de 10 à 15 cm. sur 8 à 10 cm.

Nous ne parlerons que du cinglage par percussion qui s'effectue à l'aide de marteaux-pilons de deux à trois tonnes. Les premiers coups doivent être donnés avec ménagement, l'action du marteau n'ayant pour but que de rapprocher les particules ferreuses afin de donner à la loupe une plus grande compacité, sinon on la disloquerait.

Progressivement, l'action du marteau doit devenir plus énergique : en même temps que le soudage s'accomplit, la scorie est chassée en ruisselant sur l'enclume dès les premiers instants, puis sous forme de

rticules scoriacées projetées à une certaine distance, au fur et à mere que le refroidissement de la masse ferreuse s'accentue.

Quand le massiau est formé et que sa compacité est telle que l'exlsion de la scorie n'est plus possible, on le transporte encore très aud au laminoir de puddlage. Après un certain nombre de passes, le ıssiau est transformé en une barre plate de longueur variable selon

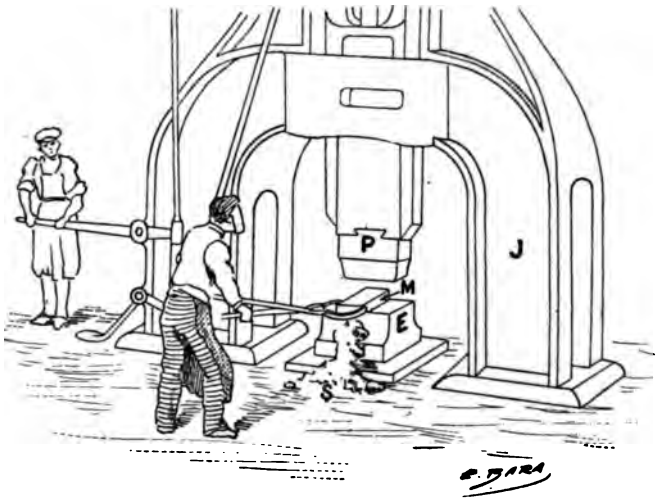


Fig. 79.

E, Enclume. — *J*, Jambages du marteau-pilon. — *P*, Pilon. — *S*, Scories.

importance du massiau et qu'on nomme un *ébauché de puddlage* ou *r brut*.

L'ébauché a 3 ou 4 mètres de longueur et une section de 8 à 12 cm. ır 2 à 3 cm.

La surface de l'ébauché n'est pas unie, elle est sillonnée souvent de etites fentes ou replis scoriacés, les arêtes ne sont pas continues, car en ertains points le fer a manqué et la scorie s'est détachée. Quant à la assure obtenue par le choc du marteau sur le bout de la barre placée n porte-à-faux après incision préalable à la tranche à froid, elle est *renue* ou *nerveuse : grenue* elle rappelle celle d'un grès un peu grossier, *erveuse* elle ressemble assez à celle des matières ligneuses à fibres lus ou moins parallèles. Quelquefois, la cassure est à grain mélangée e nerf. Nous verrons plus loin comment s'expliquent ces différents spects.

Le fer brut ne peut être employé sous cet état ; il n'a pas une homo-

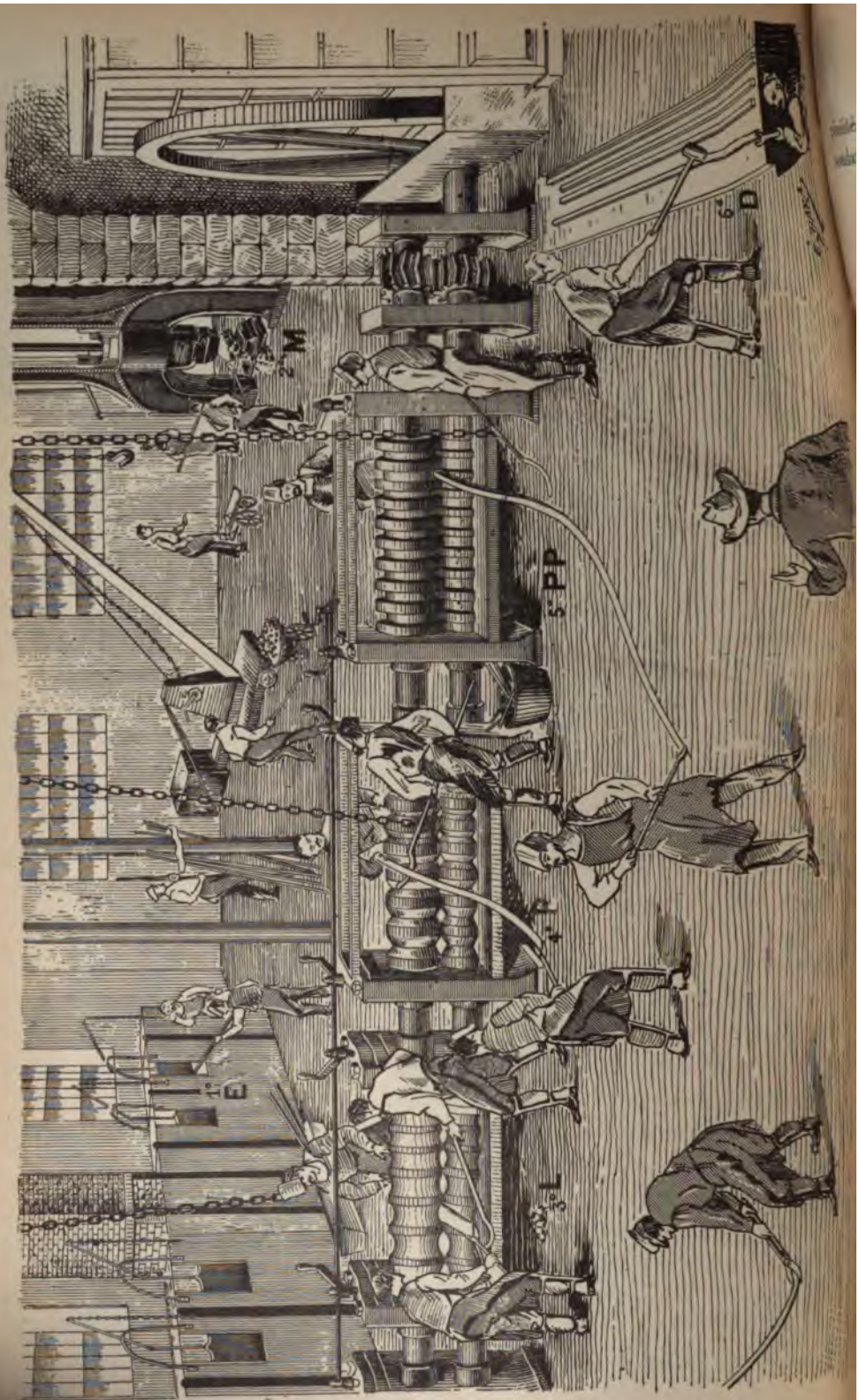


Fig. 80. — La loupe transformée en ébauché de puddlage ou fer brut.

1° *E*, Extra[illegible] de la loupe. — 2° *M*, Formation du massiau. — 3° *L*, Laminage du massiau. — [illegible] xième passe. — 5° *PP*, Ebauché de puddlage. — 6° Dressage à chaud des

ménéité, une compacité et une pureté suffisantes. Il faut améliorer le soudage de ses divers éléments, chasser une nouvelle quantité de sco-

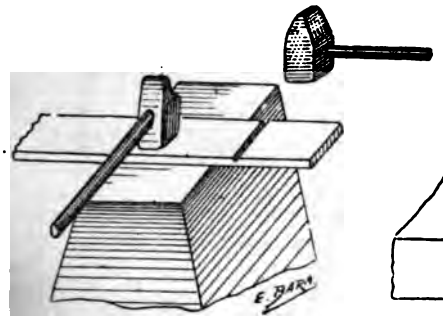


Fig. 81.

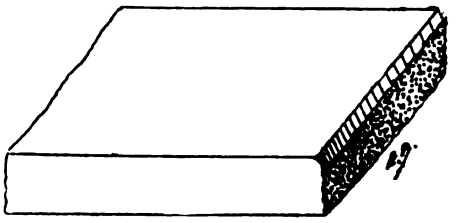


Fig. 82. — Fer à grains.

ies interposées et éliminer enfin une certaine proportion de ce qui reste encore de Mn, Si, C, etc...

C'est par l'opération du *corroyage* qu'on y arrive ; nous ne reviendrons plus tard sur cette opération que pour la définir, car son étude détaillée ressortit au « Travail des métaux ».

Quand les loupes ou balles une fois formées par le puddleur sont soumises dans le four à puddler lui-même à un bon coup de feu avant qu'on ne les retire, on dit qu'on les a soumises à un *ballage*.

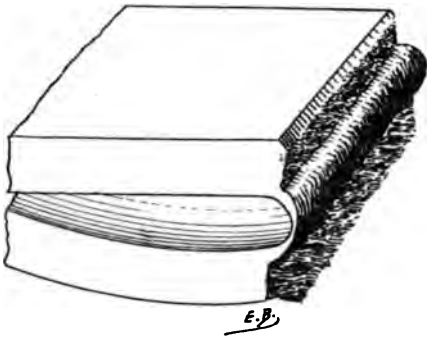


Fig. 83. — Fer nerveux.

On a ainsi élevé leur température et rendu la scorie qu'elles contiennent plus fluide et par suite plus facile à chasser.

Quelquefois, le massiau une fois formé par le pilon cingleur n'est pas passé de suite au laminoir de puddlage, mais reporté dans le four à puddler pour lui faire subir une chaude suante après laquelle on pourra, ou le marteler encore avant de le laminer, ou le laminer directement. On lit encore qu'on a procédé à un *ballage*. Le fer brut *ballé* sera évidemment plus pur, puisque la scorie plus fluide aura pu être mieux expulsée.

Il est clair que le ballage adoucit un peu le métal, car il est difficile de ne pas brûler encore un peu de carbone au cours de cette opération.

Article 2. — Puddlage mécanique

On a cherché à remplacer plus ou moins complètement, par l'action mécanique, le travail de brassage et de confection des loupes si pénible pour les ouvriers puddleurs, tout en augmentant le rendement des fours.

A. — *Procédé Lemut.* — Ce procédé, appliqué en 1862 par M. Lemut aux forges du Clos-Mortier (Haute-Marne), est assez répandu. Il s'ap-

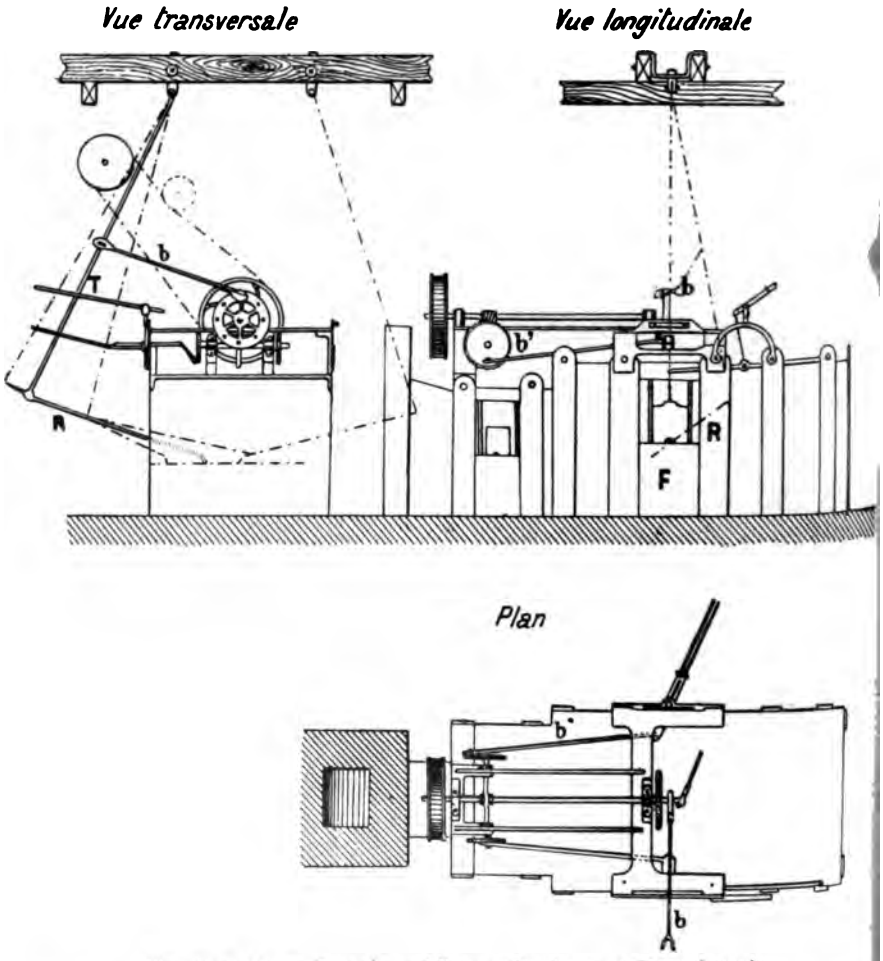
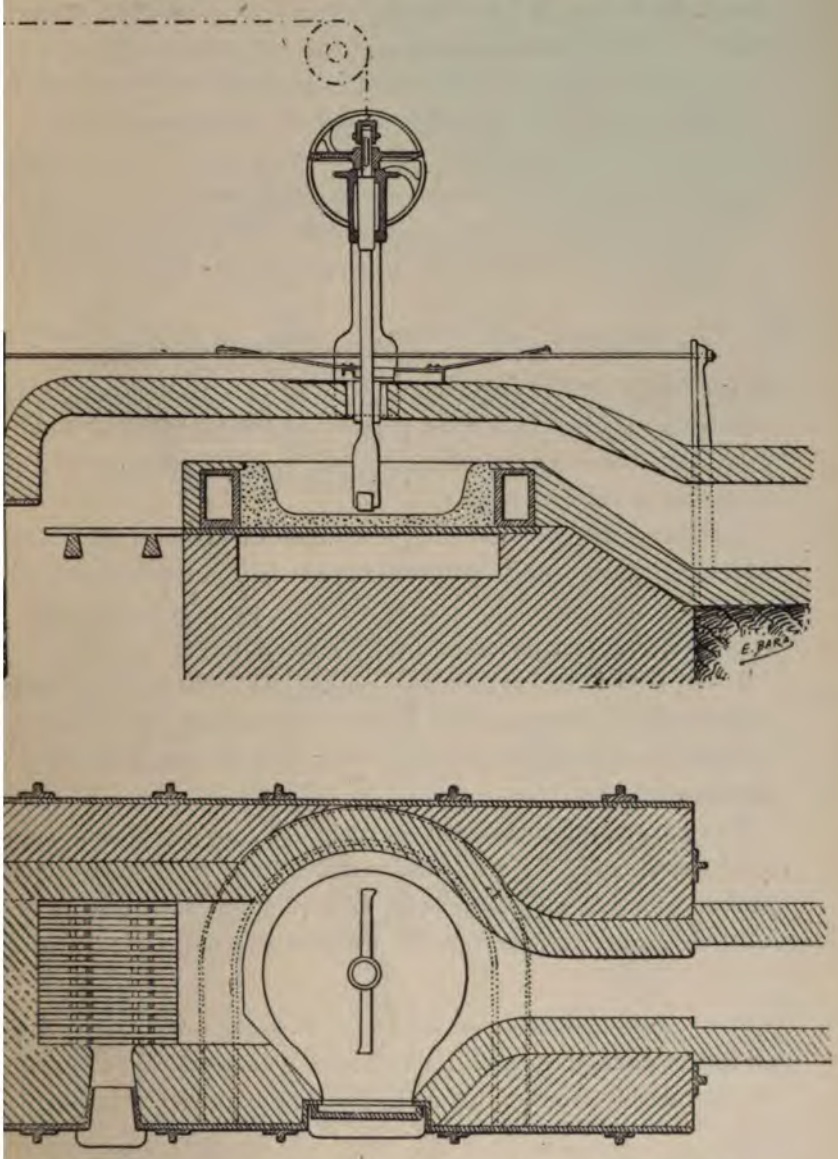


Fig. 84 et 85. — Four de puddlage mécanique, système Lemut.

F, Four. — *R*, Ringard. — *T*, Tige supportant le ringard. — *b*, Bielle du mouvement de va et vient. — *b'* Bielle du mouvement transversal.

aux fours simples ordinaires et convient surtout aux fours



. 86 et 87. — Four de puddlage mécanique, système Espinasse. — Élévation et plan.

ıriques pourvus de deux portes de travail opposées. On en a cons-
ın grand nombre aux usines du *Creusot*.

brassage est exécuté par deux crochets en fer qui, recevant d'une

machine un mouvement de va et vient, glissent sur la sole dans un sens perpendiculaire à la longueur du four en se déplaçant graduellement dans le sens de cette longueur.

Le brassage est très énergique et l'ouvrier n'a qu'à remplacer de temps en temps les crochets trop chauds par de nouveaux crochets.

On n'arrête le mécanisme qu'au moment où le fer commence à se figer et se souder, le brassage devenant alors impossible. Le puddleur n'a plus qu'à terminer l'affinage et à faire les loupes comme à l'ordinaire en décrochant le ringard de la transmission et le manœuvrant à la main.

B. — *Procédé Espinasse.* — M. Espinasse, ancien Ingénieur des aciéries et forges de Firminy (Loire), y avait installé un système de puddlage dans lequel le brassage était effectué par un brasseur mécanique à rotation dont l'effet était beaucoup plus énergique que celui des crochets mobiles de M. Lemut.

Le laboratoire est circulaire ; le sommet de la voûte est percé d'une ouverture par laquelle pénètre dans le four un arbre vertical en fer muni, à son extrémité inférieure, de deux palettes horizontales légèrement déversées en forme de bras d'hélice.

Lorsque la fonte est liquéfiée, on abaisse l'arbre et on lui imprime un mouvement de rotation (12 à 15 tours par minute) ; on le relève quand le métal commence à s'épaissir, et dès lors le travail s'achève comme d'ordinaire.

Ce système, qui nécessitait du reste des frais d'entretien assez forts, a été abandonné à Firminy ; le brassage était très énergique mais ne pouvait être prolongé au delà de 12 à 15 minutes, à cause de l'impossibilité de changer ou de refroidir les palettes pendant le travail.

C. — *Four Bouvard.* — En 1871, M. Danks essaya, en Amérique, un four à puddler rotatif. La difficulté d'entretien de la garniture fit abandonner cet appareil dont l'apparition avait vivement attiré l'attention.

M. Bouvard, ingénieur aux usines du Creusot, perfectionna ce four et créa un appareil dont le fonctionnement n'a pas cessé depuis d'être très satisfaisant.

1° *Description du four.* — Le four Bouvard comprend :

a) Le système moteur destiné à donner le mouvement de rotation à

la chambre contenant la fonte à affiner et que nous ne faisons que signaler.

b) **Une chambre tournante** comprenant une double enveloppe en tôle ;

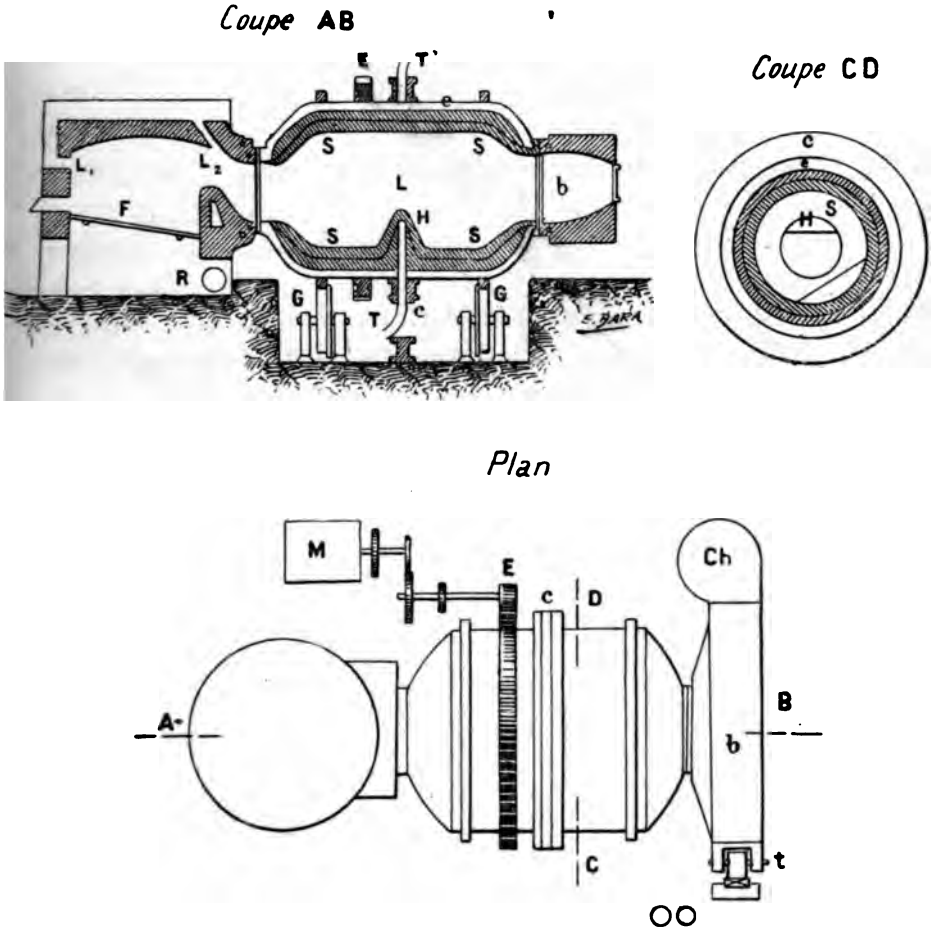


Fig. 88, 89 et 90. — Four rotatif du Creusot, système Bouvard.

***F*, Foyer. — *L*. Laboratoire. — *b*, Boîte à fumée mobile. — *t*, Axe de rotation de la boîte à fumée. — *Ch*, Cheminée. — *c*, collier fixe. — *M*, Machine motrice. — *E*, Engrenages. — *G*, Galets de roulement. — *e*, Espace réservé au courant d'eau. — *T*, Tuyau d'amenée de l'eau. — *T'* Tuyau de sortie de l'eau. — *R*, Trou de vent soufflant la grille.— L_1, L_2, Trou de vent soufflant la flamme. — *H*, Couteau séparant la loupe en deux. — *S*, Sole en minerai de Mokta.**

sur la surface intérieure de cette enveloppe est fixée la sole ou garniture du four.

Cette garniture se compose de deux couches : la première est en briques de minerai ayant la forme de coins maçonnés avec un ciment de minerai pulvérisé et mélangé d'un peu d'argile, la deuxième est destinée à ménager la première. Pour former cette seconde couche, on charge un mélange de minerai riche et de rognures de tôle mince et on active le feu en faisant arriver de l'air en excès ; la ferraille est oxydée et les scories produites cimentent et recouvrent les blocs de minerai. Collée sur la première, cette couche a une solidité qu'elle n'aurait pas si elle était directement au contact de la tôle. Seule à toucher le bain métallique, elle est aussi la seule qui s'use et qui ait besoin d'entretien. Après un certain nombre d'opérations, on la renouvelle de la même façon qu'on l'avait formée la première fois.

La chambre tournante est embrassée par un collier fixe percé de deux ouvertures : l'une, à sa partie inférieure, par laquelle arrive de l'eau froide sous une certaine pression ; l'autre, à sa partie supérieure, par laquelle s'échappe l'eau chaude. L'eau, par des trous, passe du collier dans la double enveloppe et rend, par suite, la chambre tournante indéformable, tout en empêchant aussi l'échauffement des mécanismes produisant la rotation.

La division de la charge en deux boules ou loupes est obtenue par le passage à travers le bain métallique d'une cloison transversale partielle formant une sorte de *couteau* qui divise la matière en deux parts à chaque révolution. Cette cloison creuse, pleine d'eau et en communication avec la double enveloppe, est aussi revêtue d'une couche d'oxyde de fer.

c) **Le foyer** à grille a extérieurement la forme cylindrique pour mieux résister aux déformations causées par les dilatations.

d) **La boîte à fumée** est articulée autour d'un axe horizontal, on la fait basculer de façon à démasquer l'ouverture du four quand on veut extraire les loupes.

A cause du jeu qui existe entre la chambre tournante et le foyer d'un côté et la boîte à fumée de l'autre, le foyer est à *vent forcé*, de façon à avoir un léger excès de pression dans l'appareil et éviter ainsi l'appel d'air qu'un semblable jeu entraînerait sous l'action de la cheminée. Cet air aurait le double inconvénient de refroidir et d'oxyder, outre mesure, le bain métallique.

2° *Marche de l'opération.* — La fonte à affiner est chargée à l'état liquide ; la fusion a été réalisée au préalable sur la sole d'un four à

réverbère placé à proximité. La charge de fonte est de 1000 kilos produisant deux loupes de près de 500 kilos.

L'affinage est produit par le mouvement de rotation du laboratoire qui agite le bain, renouvelle les surfaces exposées à l'oxydation, brasse et mélange la scorie riche avec la fonte.

L'opération est assez rapide, car l'oxyde de fer de la garniture demeure à découvert pendant la majeure partie du mouvement de rotation et se trouve, durant tout ce temps, exposé à l'action oxydante de la flamme. Ce mouvement opère donc non seulement le brassage proprement dit, mais favorise encore la réaction de la sole sur la fonte à affiner puisque l'oxyde de fer de la sole est constamment ramené à l'état supérieur d'oxydation.

Dès que les loupes sont formées, les ouvriers arrêtent le mouvement de la chambre tournante, relèvent la boîte à fumée et, à l'aide de tenailles portées par une grue, enlèvent successivement les loupes et les portent sous le pilon cingleur.

3° *Produits obtenus.* — Il semble que le mouvement de rotation favorise l'élimination des substances étrangères contenues dans la fonte et notamment celle du phosphore. L'emploi de ce four permettrait de traiter, avec avantage, des fontes très peu phosphoreuses pour lesquelles le puddlage à la main est absolument impuissant.

D'un autre côté, les produits fournis par cet appareil présentent deux sortes de défauts qu'il y a lieu de signaler :

a) **Ils renferment des scories** que le cinglage ne peut expulser à cause de leur état forcément pâteux dans ce mode de puddlage.

L'atmosphère et l'allure du four sont éminemment oxydantes, la scorie est presque constamment formée de silicates d'oxydes de fer à *leur maximum d'oxydation ;* or, une pareille scorie suroxydée est *peu fusible.* De plus, il n'y a aucun travail de compression exercé par le travail sur les particules ferreuses ou leurs agglomérations.

Les loupes ont, d'autre part, un poids dix fois plus fort que dans le puddlage à la main. Il en résultera que la scorie ne pourra être aussi bien expulsée au cinglage ; on trouvera des pailles, criques, etc... dans les pièces forgées.

b) **Ils contiennent des parcelles de minerai** provenant du frottement de la loupe sur la sole pendant qu'elle roule. Ces fragments de minerai non réduit s'incorporent à la loupe et, étant solides, ne peuvent être chassés ni par le cinglage, ni par le forgeage.

Mais si les fours *Bouvard* présentent des inconvénients au point de vue de la fabrication du fer marchand, ils conviennent bien, néanmoins, comme auxiliaires d'un des grands procédés d'élaboration d'acier. Ces grosses loupes, transformées au pilon en très forts massiaux, constituent, en effet, un apport important de fer métallique et d'éléments oxydés. On conçoit qu'incorporées dans un bain de fonte en fusion, elles puissent, si la température de l'appareil d'élaboration est suffisante, diluer, d'une part, le carbone du bain de fonte dans une plus grande proportion de fer et aider, d'autre part, à la combustion d'une certaine proportion de ses éléments étrangers par l'apport d'oxygène des scories interposées.

C'est surtout pour cet usage que fonctionnent les fours Bouvard aux usines du Creusot.

D. — *Four Pernot.* — En 1873, M. Pernot, Ingénieur des forges de MM. Petin et Gaudet, à Saint-Chamond (Loire), réalise le premier four à sole mobile vraiment pratique.

La fonte peut être chargée soit à l'état solide, soit à l'état liquide.

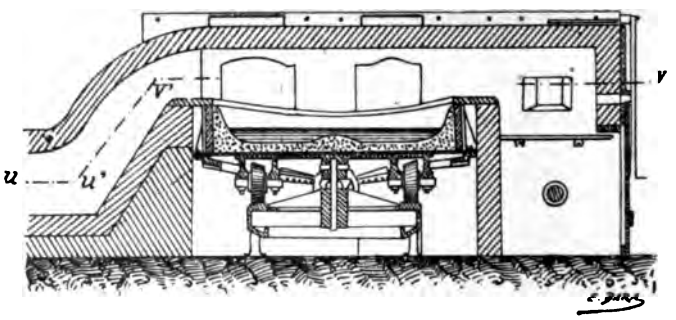


Fig. 91. — Four de puddlage rotatif, système Pernot. — Coupe longitudinale suivant X X'.

On y pratique le brassage mécanique, sans le secours de l'homme, en inclinant la sole. L'arbre central qui porte la sole n'est pas vertical mais est dévié de 6 à 7°.

1° *Description de l'appareil.* — L'appareil comprend trois parties :

a) La chauffe qui est un foyer ordinaire à la houille ou un four à gaz (1).

(1) Nous supposerons que le foyer est à la houille, nous réservant d'étudier le chauffage par le gaz lorsque nous étudierons la fabrication de l'acier au four Pernot muni de récupérateurs Siemens.

b) **Le rampant de la cheminée.**

c) **Le laboratoire** placé entre les deux ; il est à *voûte et à parois fixes* mais à sole mobile installée sur un chariot, ce qui facilite les réparations.

Le four est muni de deux portes presque contiguës placées à droite et à gauche du point le plus bas de la sole.

La plus grande des deux est la vraie porte de travail par où l'on sort les loupes.

La sole mobile circulaire est composée d'une cuvette en forte tôle à

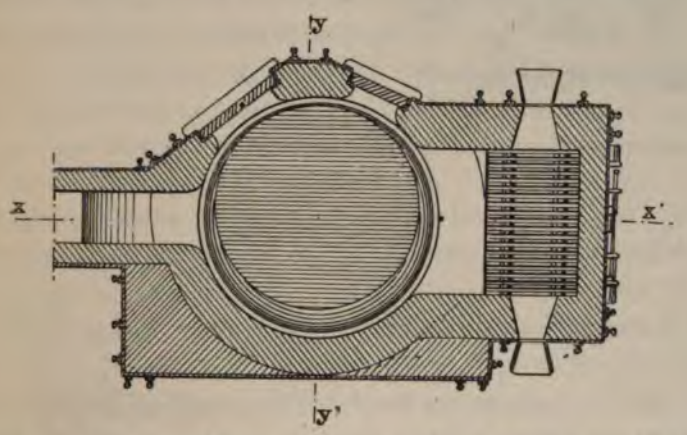


Fig. 92. — Four de puddlage rotatif, système Pernot. — Coupe horizontale suivant *U U' V V'*.

fond plat et à parois cylindriques et d'une garniture; celle-ci est formée de minerais riches et purs cimentés par fusion au moyen de battitures et de scories de cinglage. Elle est relevée en forme de cordon le long des bords de la cuvette et parfois aussi renflée vers le centre. Une roue dentée fixée au-dessous de la sole permet de lui imprimer un mouvement de rotation au moyen d'un pignon.

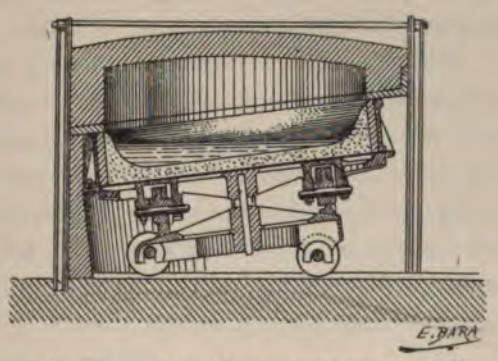


Fig. 93. — Coupe transversale suivant *Y Y'*.

Entre le dessus de la cuvette mobile et la plaque en fonte supportant

la voûte fixe, on laisse un jeu d'environ 3 à 4 cm. à cause des déformations.

Pouse mettre à l'abri de l'air froid qui affluerait par là sous l'appel de la cheminée on emploie un foyer soufflé, mais il faut éviter d'avoir un excès de pression à l'intérieur du four pour ne pas gêner le travail du puddleur et pour ne pas brûler la plaque de support des parois fixes.

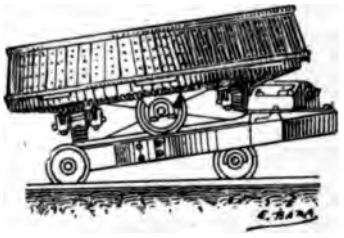


Fig. 90. — Sole mobile.

2° *Marche de l'opération.* — L'oxyde de fer de la garniture est à découvert pendant la majeure partie du mouvement de rotation ; il se passe alors le même phénomène que celui que nous avons décrit à propos du four Bouvard.

Malgré cela, si on veut activer l'affinage, il convient de faire intervenir le puddleur avec son crochet, comme dans le four à sole horizontale. En appuyant simplement le bout du crochet sur la sole en mouvement, il accroît l'énergie du brassage sans avoir à déployer beaucoup de force.

Dès que le fer commence à se figer, le travail de l'ouvrier devient nécessaire ; en pressant le tranchant de la palette sur la sole tournante, on empêche l'adhérence des grumeaux de fer. Mais bientôt la masse entière se fige; on ralentit alors le mouvement, puis l'ouvrier brise, soulève et retourne les masses ferreuses au moment de leur passage en face des portes. Cela fait, le puddleur arrête la sole et prépare les loupes comme à l'ordinaire.

Grâce aux fortes charges qu'on peut y affiner, le four Pernot consomme moins de houille que le four simple ordinaire, on en économise environ 30 0/0 et c'est là son avantage principal ; mais il offre, quoique à un degré moindre, les inconvénients des fours à chambre tournante et ne permet pas de se passer complètement du travail du puddleur. Il faut signaler aussi l'usure rapide de la sole qui absorbe de grandes quantités de minerais, de riblons ou de crasses riches.

ARTICLE 3. — COMMENT PUDDLERA-T-ON POUR AVOIR DES FERS OU DES ACIERS ?

Nous avons vu plus haut qu'un ébauché de puddlage pouvait présenter une cassure à *grains* ou une cassure à *nerf*.

Dans le premier cas, le métal s'est rompu sous le choc du marteau assez brusquement sans allongement sensible, donnant une section assez nette presque perpendiculaire à la longueur de la barre.

Dans le deuxième cas, le métal n'a cédé souvent que dans la région la plus distendue et n'a pas donné une section bien nette mais caractérisée, au contraire, par des aspérités plus ou moins longues appelées arrachements, témoignant de la plus grande ductilité du métal qui a pu s'allonger avant de se rompre par flexion.

La cassure à grains est l'indice d'un fer relativement dur, la cassure à nerf celui d'un fer plus doux.

Il reste entendu que nous supposons n'avoir affaire qu'au métal brut de l'ébauché, car il est acquis qu'un fer nerveux peut devenir à *grains* et, réciproquement, selon le genre de travail mécanique ou calorifique auquel il aura été soumis.

En résumé, le métal le plus doux obtenu au four à puddler sera le fer nerveux, le plus dur sera l'acier, entre les deux on aura le fer à grains.

A. — *Puddler pour fer à grains ou pour aciers.* — D'une manière générale, le puddlage donnera du fer à grains quand toutes les circonstances facilitant la séparation de la scorie de la masse ferreuse se trouveront réalisées. Il faudra, par suite, assurer aux scories, en cours ou en fin de puddlage, la plus grande fluidité.

1° *De la fluidité de la scorie.* — Or, plus la scorie sera fluide, plus elle se séparera de la fonte soumise à l'affinage, formant au-dessus d'elle une nappe protectrice contre l'atmosphère oxydante. Il en résultera ainsi une plus grande difficulté pour assurer, par le brassage, le contact intime entre la fonte et la scorie.

Pour toutes ces causes, l'affinage sera retardé, peut-être même limité; en tous cas, il sera plus lent et plus progressif, la décarburation étant conduite presque au gré du puddleur.

Par le fait même que les scories s'isolent mieux de la masse métallique, il en résultera que le produit de l'affinage pourra être plus carburé et qu'on aura un fer plus dur ou un acier.

Il ne paraît pas démontré, en effet, que le grain soit dû à la présence du carbone.

La texture à grains se rencontre toujours dans les aciers obtenus à l'état liquide, même quand on a poussé la décarburation à sa dernière limite. Les fers au bois, c'est-à-dire ceux qui ont été obtenus dans l'affinage au bas-foyer (1) présentent toujours la texture grenue, même quand ils sont très doux.

Nous supposons, toutefois, dans ce qui précède, que les métaux en question n'ont subi, après la coulée, qu'un simple travail préliminaire de laminage ou de martelage terminé à une température pas trop basse. Et, en effet, après la trempe, les fers au bois ou les aciers extra-doux prennent la texture nerveuse, mais c'est là un phénomène résultant de la trempe elle-même et ne se rapportant plus au métal naturel, soit au métal brut.

Quelles sont donc les conditions à réaliser pour la fluidité de la scorie ?

Il y en a deux principales :

a) Les fontes traitées devront être riches en certains éléments;

b) La température de travail devra être élevée.

Supposons que les fontes affinées soient telles que les scories formées soient fluides ; si la deuxième condition est réalisée, le fer sera mou, ses grumeaux pourront se souder plus facilement et cela d'autant mieux qu'il y aura moins de scorie accumulée dans leurs interstices.

La température plus élevée permettra aussi à la force cristallogénique de se manifester dans une certaine mesure; il y aura tendance au groupement cristallin.

Toutes ces causes favorisent la formation du grain.

2° *Nature des fontes traitées.* — Les fontes rendant surtout les scories fluides et permettant d'enrichir le fer en carbone, tout en facilitant la soudure de ce fer carburé (fers à grains ou acier), sont les *fontes manganésées*.

Le manganèse retarde la décarburation, car il ramène sans cesse le

(1) La présence des alcalis provenant des cendres du combustible végétal rend les scories très fluides ; en outre, la température de travail est fort élevée.

oxydé supérieur à l'état de protoxyde. Or, le carbone est surtout iné par le fer oxydé supérieur; tant qu'il y aura Mn dans la fonte, affinité (1) pour O empêchera cet oxyde de se former et C restera s le métal.

uis, grâce à l'absence des oxydes supérieurs du fer et à leur placement par FeO et MnO, les silicates à bases multiples ainsi nés seront plus fluides, surnageront au-dessus de la fonte et pertront alors au puddleur de se rendre maître de la décarburation.

lus tard, la fluidité du reliquat de scories interposées rendra plus ace l'action du pilon cingleur.

es fontes phosphoreuses rendront aussi les scories plus fluides par nation de phosphates de fer et de manganèse et faciliteront, de ne, la formation du grain, d'autant plus qu'il restera toujours une aine quantité de phosphore dans le métal affiné et que le fer carbé et phosphoreux, même très légèrement, est très mou et très soudable.

Nous n'avons cité que pour mémoire l'emploi des fontes phosphoses; nous connaissons l'influence nuisible de Ph dans les fers et amment dans les aciers. Ceux-ci, comme les fers fins, ne devront e obtenus qu'en traitant des fontes manganésées pures ou des fontes es auxquelles on aura associé une certaine quantité de *Spiegel*.

1° *Pratique de l'opération.* — Le puddlage pour fers à grains ne ère du puddlage pour aciers que par la durée de la décarburation. Supposons réalisées les deux conditions précitées : fluidité de la scorie haute température.

Le brassage ne commencera pas dès la fusion de la fonte, il y a intéà laisser reposer ou *cuire* le bain avant le brassage.

Pendant cette cuite qui dure environ 20 minutes, on laisse le clapet vert et on se contente de remuer, de temps en temps et très lentent, la masse fluide avec le crochet.

En opérant ainsi, on élève beaucoup la température sans que l'affige soit trop hâtif; Si et Mn s'éliminent seuls, passent à la scorie à uelle ils donnent une grande fluidité que favorise l'élévation de la npérature.

Le carbone est protégé contre l'oxydation, soit parce que le brasge proprement dit n'a pas encore commencé, soit parce qu'il y a du nganèse.

(1) Voir ce qui a été dit plus haut sur MnO à l'étude des fontes spéciales.

On ne brassera la masse que quand le bouillonnement de la fonte commencera à se manifester : *alors le bain ressemble à du riz cuit dans du lait.*

La finesse des grains métalliques apparaissant en fin de brassage est caractéristique de l'acier; si les grains sont assez gros ce sera du fer plus ou moins dur et non de l'acier.

Presque toujours les aciers ou les fers fins à grains subissent *le ballage.*

B. — *Puddler pour fer nerveux ou pour fer doux.* — Le fer nerveux est un fer plus riche en scorie que le fer à grains. Il est, en général, plus affiné.

La plus grande quantité de scorie interposée peut provenir de plusieurs causes :

a) La température de travail au puddlage aura été moins élevée;

b) Les fontes traitées ne fournissent pas une scorie assez fluide;

c) La scorie sera devenue plus pâteuse, l'affinage ayant été poussé beaucoup plus loin.

Les expériences de MM. Lan et List ont montré qu'à mesure que l'affinage avance, les scories se suroxydent et deviennent pâteuses.

Les silicates s'enrichissent de plus en plus en oxydes de fer, comme on sait ; or, les silicates basiques sont d'autant plus riches en ces oxydes que le bain à affiner aura été moins épargné par l'oxydation.

Ces scories pâteuses ne pourront s'éliminer aussi facilement par le cinglage que celles qu'on recherchait dans la fabrication du fer à *grains* ou de *l'acier.*

La cause retardatrice de la décarburation n'existera plus avec une scorie qui n'est pas fluide.

Si, au début du puddlage, le puddleur travaille de suite à registre ouvert et que le bouillonnement, au lieu d'être lent et progressif, se produise très activement, quoi qu'il fasse et quelle que soit la nature des fontes traitées, au lieu de fer à grains, il aura du fer à nerf. La décarburation n'aura pas été progressive ; tous les corps étrangers auront été brûlés dans leur ordre d'oxydation, il est vrai, mais une grande quantité de fer se sera brûlée suroxydant rapidement la scorie, la transformant en un meilleur véhicule de l'oxygène, et cela d'autant plus que, rendue moins fusible, elle s'incorporera mieux à la masse.

Le fer à grains en loupe, fabriqué comme on l'a dit plus haut, pourra

ner un fer nerveux après cinglage si pour un motif quelconque on ırde l'opération du cinglage, car alors le reliquat de la scorie interée a le temps de s'épaissir.

:. — *Digression sur le corroyage.* — Quoique l'étude du corroyage ıortisse au « *Travail des métaux* », nous ne pouvons cependant nous ɔenser d'en parler afin de compléter notre précédente étude.
.'analyse chimique démontre que le fer nerveux est plus scoriacé que :r à grains.
Nous citerons deux expériences à titre d'exemple :
re expérience. — Dans une fabrication de fer à grains irrégulière, : loupe a donné des ébauchés *à grains* et des ébauchés *à grains mégés de nerf*. Après analyse (Annales des mines, tomes VI, H. *Le ître lier*) on trouve dans un ébauché en *partie à nerf* deux fois plus de ries que dans un ébauché à *grains*.
Dans ce dernier on constate encore des quantités appréciables de C le Ph : dans l'ébauché en partie à nerf, C n'est pas dosable, Ph y ure dans une proportion moitié moindre.
Deux fragments d'un ébauché à *grains* ont été réunis en paquet, c'est-lire superposés et consolidés par une ligature en fil de fer ; puis, rté au blanc soudant, ce paquet a été transformé en une barre, ce qui lonné du fer une fois corroyé.
La même opération a été faite avec un ébauché en partie nerveux. On a constaté à l'analyse une diminution très sensible dans la prortion de scorie interposée.
Le corroyage éliminant la scorie donne de l'homogénéité aux métaux sés. Ce qu'on a fait une fois avec une barre de fer ou d'acier puddlés, peut le faire une deuxième fois avec la barre obtenue après un preer corroyage, on obtiendra du fer ou de l'acier corroyés deux fois ainsi de suite.
On ne va généralement pas au delà de trois corroyages car :
a) *La main d'œuvre et le combustible coûtent cher ;*
b) *Il y a déchet de métal à chaque opération ;*
c) *La dureté du fer ou de l'acier est abaissée ;* et, en effet, le carne ayant plus d'affinité que le fer pour l'oxygène s'oxyde chaque fois ıs que ce métal : après plusieurs opérations de corroyage sur de :ier ou du fer dur, on obtiendrait du fer doux.
Du reste, pour prévenir autant que possible, pendant le chauffage,

l'oxydation de la surface et éviter par suite la décarburation du métal quand on traite du fer dur ou de l'acier, on saupoudre le paquet avec de l'argile assez fine. Cette argile facilite aussi l'expulsion d'une certaine partie de l'oxyde de fer superficiel par formation d'un silicate double d'alumine et de fer.

d) Les chauffages répétés nuisent à la qualité des fers et des aciers, la force cristallogénique ayant tendance à se manifester et le fer pouvant s'oxyder.

L'état cristallin et l'interposition d'oxyde de fer sont les deux caractéristiques du fer brûlé.

Tous les objets en fer ou en acier puddlés proviennent de paquets; ces paquets peuvent être constitués avec des fers plus ou moins corroyés sans qu'on s'astreigne à composer les mises avec des fers au maximum de corroyage afin d'améliorer la qualité. Il ne faut pas oublier, en effet, que l'objet que devra fournir le paquet ne sera obtenu qu'après un travail énergique de celui-ci, soit au pilon, soit au laminoir, et qu'un pareil *façonnage* constituera souvent le meilleur des corroyages.

2e expérience. — Dans une autre expérience (Annales de chimie et de physique, tome VIII) un morceau de fer nerveux a été traité par un courant de Cl gazeux à la température du rouge sombre, le fer a été volatilisé et l'on a obtenu comme résidu un squelette présentant exactement la forme du morceau primitif. Ce résidu très ténu et très léger est composé de silice en forte proportion et d'un peu d'oxyde de fer; ce sont les scories interposées dans le fer qui ont résisté partiellement à l'action de Cl, tandis que le fer et les métalloïdes qui lui étaient combinés ont été complètement volatilisés.

La proportion de scorie a été trouvée égale à 1,3 0/0.

Un morceau de fer à grains soumis à la même expérience a donné une proportion de scorie égale à 0,7 0/0, soit moitié moindre environ.

Article 4. — Perfectionnements récents apportés au four a puddler

En réalité, le puddlage classé depuis longtemps dans la catégorie des procédés destinés à disparaître subit depuis quelques années une véritable transformation à un double point de vue :

a) Le mode de chauffage direct par la houille brûlée sur grille est

lacé dans les nouvelles installations par le chauffage au gaz avec s ses variantes.

Les métaux puddlés tendent de moins en moins à être employés un usage direct, ils sont le plus souvent utilisés comme apport llique dans les procédés d'élaboration des métaux ferreux fondus, qu'on le verra dans la suite.

ıus ne nous occuperons pour l'instant que des perfectionnements rtés au mode de chauffage.

ı lieu de puddler à la houille, on peut puddler au bois, à la tourbe, gnite ; mais comme ces combustibles sont aquifères et renferment, ıtre, beaucoup d'oxygène, ils chauffent moins et oxydent davantage. ıtôt que de les employer sinon *torréfiés* ou au moins fortement ·chés, il vaut mieux transformer en gaz ces combustibles de qualité ieure en les brûlant d'une façon rationnelle pour en récupérer le mum de chaleur.

ɔpération du puddlage ne subit d'ailleurs aucune modification, aussi 'eviendrons-nous qu'accidentellement pour signaler au besoin l'in- ce que peut exercer sur le métal produit une température plus élevée.

— *Four de puddlage au gaz système Siemens.* — Le chauffage au ɔar le système *Siemens* sera longuement étudié lorsque nous trai- ıs de la fabrication des métaux fondus par le procédé *Martin*.

ɔus pouvons dire, sans anticiper sur les développements ultérieurs, ı arrive à réaliser ainsi des températures de combustion très élevées ıisant circuler les gaz combustibles produits par un gazogène et nécessaire à leur combustion, dans de puissants massifs en maçon- : réfractaire échauffés au préalable par la chaleur que leur ont cédée ɔroduits brûlés en se rendant à la cheminée.

ı seule difficulté qui résulte de l'emploi des gaz provient des ıreils dits de récupération (massifs en briques réfractaires) qui sont lement obstrués par les scories et les globules de fer formés dans ·riode du bouillonnement. Ce simple fait a empêché l'adoption des s *Siemens* pour le puddlage dans un grand nombre de forges. On cependant remédier en partie au mal en disposant entre le four à dler et les chambres à briques un compartiment spécial (voir figure facile à ramoner et où les particules entraînées viennent se ɔser. En plaçant ce réduit de façon que les gaz ne puissent y par- r qu'en passant au travers d'un carneau vertical de 70 à 80 centi-

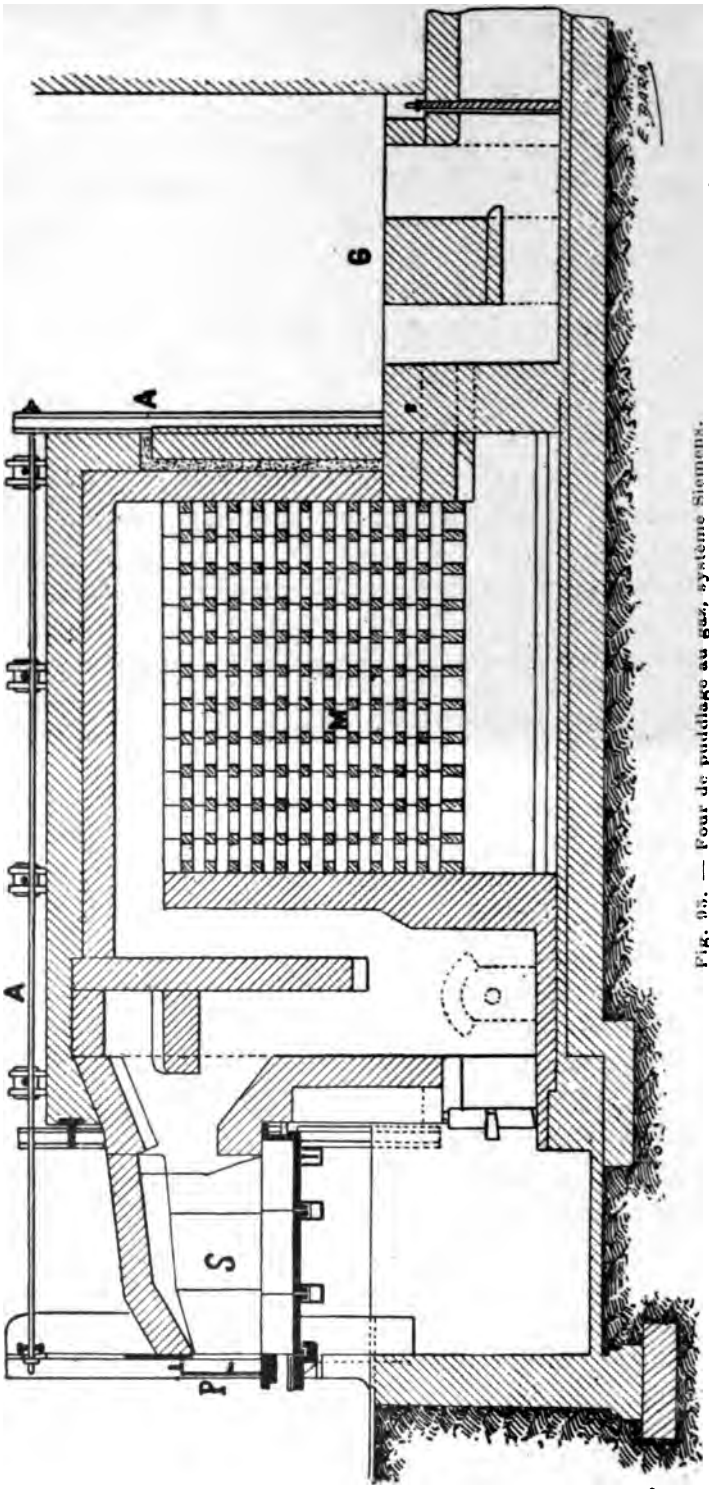


Fig. 95. — Four de puddlage au gaz, système Siemens.

A A, Armature métallique du four. — *G*, Gazogène. — *M*, Massif réfractaire. — *P*, Porte de travail. — *S*, Sole du four.

ètres de longueur, l'entraînement sera faible, surtout si onmodère en ème temps le tirage du four.

Au lieu de préparer du gaz dans des gazogènes à l'aide de combus- les de qualité inférieure, on peut amener directement dans les chambres récupération les gaz venant des hauts-fourneaux quand l'usine en ssède en nombre suffisant. Cette solution n'est applicable qu'au auffage des fours à puddler, car ces gaz ne sont pas assez riches en ments combustibles pour réaliser, par leur combustion, la tempéra- e nécessaire à la fusion de l'acier.

Nous donnons ci-dessous un autre exemple de puddlage au gaz, n plus avec chambres *Siemens*, mais avec application du système *nsard*.

B. — *Four de puddlage au gaz système Ponsard.* — Tandis que ns le système *Siemens* on dispose de conduits multiples en briques ractaires tour à tour parcourus en sens inverse par les gaz brûlés i cèdent leur chaleur, et par l'air ou les gaz combustibles qui l'enlèvent nouveau aux parois de ces conduits, dans le système *Ponsard* on fait sser les produits de la combustion par une série nombreuse de car- aux parallèles reliant le laboratoire à la cheminée. Ces carneaux sont nince paroi et isolés les uns des autres par un ensemble de conduits mblables que parcourt en sens inverse l'air aspiré par le foyer. On ilise ainsi, par voie de chauffage méthodique, une partie de la chaleur ui, dans les fourneaux ordinaires, se dissipe en pure perte par les che- inées. — Un gazogène est, en outre, accolé au four fournissant le az combustible que brûlera l'air chauffé par son passage dans les con- uits qu'auront réchauffés *par conductibilité* les gaz brûlés se rendant la cheminée. — Tandis que le système *Siemens* est basé sur le prin- pe bien plus fécond de la régénération de la chaleur, comme on le rra plus tard, le système *Ponsard* est basé sur le principe de la con- ctibilité.

Nous donnons ci-dessous à titre d'exemple, et d'après le *Bulletin de Société de l'Industrie minérale de Saint-Etienne*, la description mmaire d'un four à puddler au gaz imaginé par M. *Piecka*, sous- irecteur des grands établissements de *Witkowitz* en *Moravie* et fondé r le principe de la conductibilité.

Ce four à puddler permet le traitement de charges de 500 kilogrammes. La sole est double et portée tout entière par un piston hydraulique

dont la course n'est que de 3 à 5 cm, suffisante pour soulever le four, dégager les joints des autels et faire tourner le tout de 180°.

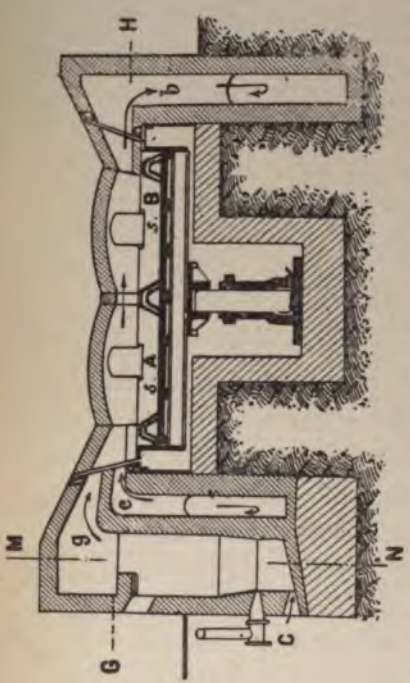


Fig. 97. — Four à puddler au gaz, système Piecka. — Coupe longitudinale *A B*. *A B*, Soles. — *b*, Gaz brûlés. — *g*, Gaz. — *e*, Air chaud. — *C*, Cendres ou laitiers.

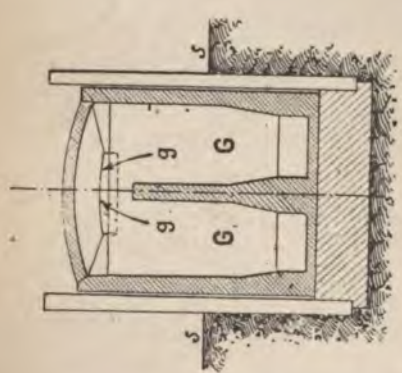


Fig. 96. — Coupe par *M N*. *g g*, Gaz. — *G G*, Gazogène. — *S*, Sol.

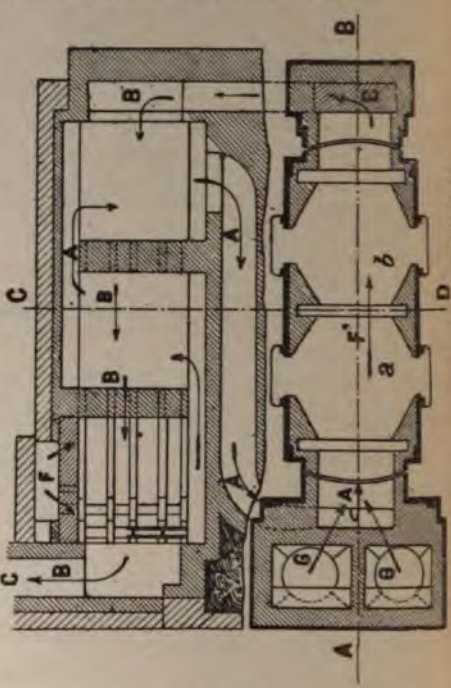


Fig. 99. — Plan coupe par *E F G H*.

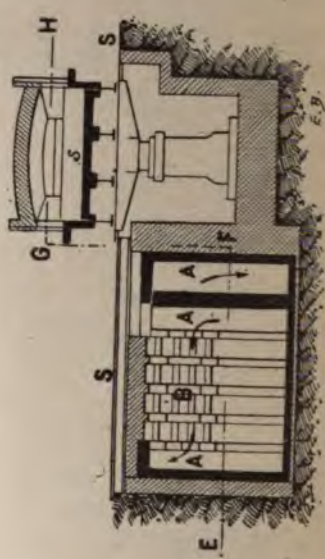


Fig. 98. — Coupe transversale *C D*. *A A A*, Air. — *B*, Gaz brûlés. — *e*, Sole. — *S*, Sol.

Le gazogène accolé au four est à double cuve, chacune des cuves est munie d'une tuyère et d'un trou de coulée pour l'écoulement des laitiers

duits par l'addition d'un fondant destiné à rendre les cendres du rbon fusibles.

a charge d'une des soles étant terminée, on retourne le four pour ailler au crochet celle du compartiment B qui est fondue et on arge en A. On évite ainsi tout arrêt dans le travail, il n'y a pas temps perdu pour la fusion, le déchet estréduit à un minimum ce au réglage facile du mélange de gaz et d'air dans le four et, out à ce que ce mélange étant introduit sous pression, il n'y a pas entrées d'air oxydantes par les portes.

. — *Puddlage direct au gaz, système Bonehill.* — Nous nous borne- s à quelques indications sommaires sur ce procédé nouveau, inauguré M. *Bonehill* en 1894, et dont la description figure dans les comptes- dus du meeting d'automne (1895) de l'*Iron and Steel Institute.*

a fonte liquide est amenée directement du haut-fourneau dans un rvoir approprié, installé près des fours à puddler et chauffé soit ctement, soit par des flammes perdues. La fonte coulée dans une he de fonderie est versée par une porte de travail sur la sole du four uddler.

es fours sont doubles, chauffés au gaz à l'aide de quatre gazogènes. e rendement de cette fabrication serait fort élevé, s'il faut en croire résultats publiés à ce jour, mais il convient d'ajouter qu'elle ne rait s'appliquer à des produits fins. Il est reconnu qu'il y a nécessité puddler des fontes chaudes et de qualités bien déterminées pour borer des fers fins ; or, on ne peut les obtenir, d'une façon certaine, s la marche continue d'un haut-fourneau. C'est là une remarque t importante à faire dans tous les procédés métallurgiques s'appli- ant à des produits de première fusion.

Le procédé *Bonehill* pourrait peut-être s'adapter aussi bien à la fa- ication des fers communs qu'à celle des fers fins dans les grandes stallations où marchent simultanément plusieurs hauts-fourneaux. s réservoirs constitueraient alors des *mélangeurs* dans lesquels on verserait les différentes fontes obtenues en première fusion.

D. — *Conclusion sur le puddlage au gaz.* — Les frais d'installation emière des massifs réfractaires servant à la régénération de la cha- ur étant mis à part, il est clair qu'en puddlant à haute température, durée de l'opération se trouve fort réduite et procure une notable onomie.

D'autre part, le fer ou l'acier obtenus sont plus compacts et moins scoriacés, car les loupes formées à température élevée ont une scorie très fluide et facile à éliminer au cinglage. Une condition, néanmoins, s'impose pour réaliser par la chaleur la fluidité de la scorie : c'est de travailler dans une atmosphère neutre ou réductrice; nous avons vu qu'une scorie suroxydée a un point de fusion beaucoup plus élevé. L'étude complète du chauffage *Siemens* nous permettra de donner à ce sujet quelques éclaircissements.

TITRE III

FABRICATION DES FERS ET ACIERS FONDUS

PAR LE PROCÉDÉ BESSEMER

Principe du procédé.

'est en 1856, le 12 février, que sir Henry Bessemer, dans une séance norable de la *British Association* réunie à *Cheltenham* faisait sa mière communication sur un procédé nouveau d'élaboration des aux ferreux, sous le titre paradoxal de *Fabrication du fer et de ier sans combustible.*

)ans son brevet, *Bessemer* proposait d'abord de lancer de l'air ou la vapeur d'eau au travers d'un bain de fonte en fusion. L'inventeur bientôt abandonner l'idée d'utiliser la vapeur d'eau, car pour ler les éléments combustibles de la fonte par l'oxygène de la vapeur ıu, il eût fallu, pour le séparer de sa combinaison avec l'hydrogène, restituer au moins une quantité de chaleur équivalente ; l'hydrogène ıt le corps dont la combustion développe le plus de chaleur. Le ı de fonte se serait donc refroidi au lieu de se réchauffer.

ɛssemer s'arrêta au principe suivant :

'aire passer dans une sorte de grand creuset ou de cornue appelée vertisseur et construite en matériaux réfractaires, au travers de la e en fusion, un très grand nombre de minces jets d'air fortement primé.

et air accomplit à lui seul les trois conditions que réclame tout bon nage :

' oxyde, il chauffe, il brasse la fonte liquide.

'ue faut-il entendre quand on dit que l'élaboration du métal se fait s *dépense apparente de combustible ?*

ans doute, le combustible n'est pas brûlé au contact du métal ou l'appareil d'élaboration, mais *il se consomme sous les chaudières* de

la machine soufflante. Cette énergie calorifique dépensée se transforme en énergie mécanique puisque l'air venant de l'atmosphère est ainsi lancé sous pression au travers de la fonte liquide. A son tour, cet air oxyde les éléments étrangers contenus dans la fonte ; en les oxydant il développe, par cette combustion intermoléculaire, une quantité de chaleur qui pourra être suffisante pour maintenir liquide la masse métallique affinée.

Nous assistons, en réalité, à des phénomènes d'équivalence qui nous sont aujourd'hui particulièrement familiers. On craignit, à l'époque, qu'en faisant passer de l'air froid au travers d'un bain de fonte, le fer ne se figeât avant que la combustion fût assez développée pour combattre le refroidissement. Il ne faut pas oublier qu'une quinzaine d'années à peine s'étaient écoulées depuis les travaux remarquables de *Joule* et de *Robert Mayer* sur l'équivalence mécanique de la chaleur.

Les éléments combustibles que toute fonte sortant du haut-fourneau contient nécessairement (Si, Mn, etc...) et dont il faut la débarrasser plus ou moins complètement pour obtenir un fer ou un acier plus ou moins doux, produisent pour la plupart en brûlant, des oxydes fixes (SiO^3, Mn^3O^4, MnO,.....) restant dans la cornue. S'ils ont un pouvoir calorifique élevé, ils apporteront au bain une grande quantité de chaleur.

Du reste, la chaleur emportée par les gaz et les parois de l'appareil est plus que compensée par celle que développe l'oxydation de ces éléments, du moins dès que l'on opère sur plus de 500 à 1000 kilogrammes de matière.

On craignit aussi que par le passage de l'air en contact si intime avec la masse métallique, le fer ne fût trop fortement oxydé. Cette crainte était légitime ; le haut degré d'oxydation du métal lors des débuts de la fabrication, faillit compromettre le succès du procédé, ainsi qu'on l'expliquera dans la suite. Quoique le fer ne soit presque pas atteint, au moins d'une façon permanente, tant qu'il reste dans le bain une quantité appréciable de silicium, de manganèse, de carbone, etc..., on conçoit que forcément ce métal finira par s'oxyder. Il y aura donc nécessité d'opérer à un moment donné ce qu'on a appelé un *raffinage*, soit une désoxydation, tant pour diminuer le déchet du métal principal que pour améliorer sa qualité en le débarrassant de toute trace d'oxyde.

CHAPITRE PREMIER

BESSEMER ACIDE

.e convertisseur *Bessemer* est en tôle rivetée et garni intérieurement terre réfractaire plus ou moins argileuse, soit sous forme de briques erposées, soit à l'état de pisé fortement damé contre la paroi.
:ette terre réfractaire est siliceuse et constitue ce qu'on a appelé le *nissage acide* par opposition au *garnissage basique* dont nous parons plus loin.
l convient, toutefois, de noter ce fait que dans un convertisseur semer acide on ne peut traiter que des fontes provenant de mine- purs, *exempts surtout de phosphore.*
.a raison en a été déjà donnée au sujet du puddlage : la silice de la oi déplace, de ses combinaisons avec les bases, l'acide phosphorique ultant de la combustion du phosphore; celui-ci est réduit à son tour l'oxyde de carbone lors de la décarburation, et finalement le sphore ne peut être éliminé de la fonte soumise à l'affinage.
.'étude du *Bessemer acide* aura donc trait à l'affinage d'une *fonte phosphoreuse.*

Article 1er. — Historique du procédé

Dans ses recherches sur les métaux à canons, *Bessemer* reconnut, 1854, l'avantage que présenterait l'adoption d'un métal plus dur et s élastique que le bronze. Il fut ainsi amené à chercher un moyen produire en grande masse l'acier fondu, et après avoir inutilement té de réaliser dans un four à reverbère la fusion d'un mélange de te et d'acier, il finit par arriver à l'idée d'employer simplement un urant d'air froid pour effectuer l'affinage ; il comptait sur la chaleur gagée par l'oxydation des substances étrangères contenues dans la te pour produire l'élévation de température nécessaire à l'obtention l'acier fondu.
Les premières expériences de *Bessemer* eurent lieu à *Baxterhouse* ubourg de Londres) et furent effectuées dans un creuset de 18 kilos

chauffé dans un four à creusets ordinaire, et pourvu d'un trou de coulée pour l'évacuation du métal fondu et d'un tube central en argile

Fig. 100. — Appareil primitif de Bessemer.

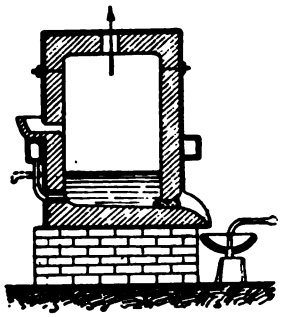


Fig. 101. — Appareil de Saint-Pancras (1856).

par lequel on introduisait le vent. On y fondait 4 à 5 kilos de fonte que l'on soufflait ensuite.

Après cet appareil primitif vient la cornue fixe employée aux expériences publiques de *Bessemer* à *Saint-Pancras*, en 1856, à soufflage latéral.

Avec cette disposition, il était impossible d'interrompre l'opération pour faire une prise d'essai, car la fonte remplissait les tuyères à chaque arrêt du vent. Aussi Bessemer fut-il amené à rendre son appareil mobile. Les figures ci-dessous indiquent les divers dispositifs essayés

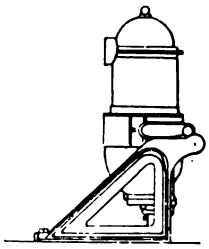


Fig. 102. — Première cornue rotative (1856)

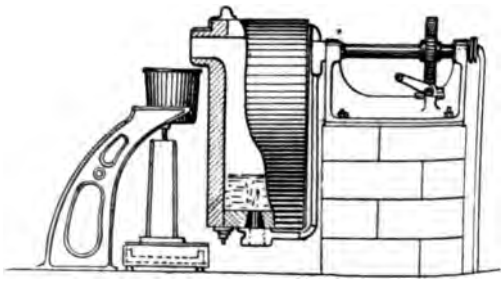


Fig. 103. — Cornue rotative à tuyères émergentes (1856 environ).

par cet inventeur avant d'arriver au type de convertisseur actuellement en usage.

Les cornues expérimentées sont rotatives, le trou de coulée se trouve dans l'axe des tourillons, de sorte que l'on pouvait facilement couler

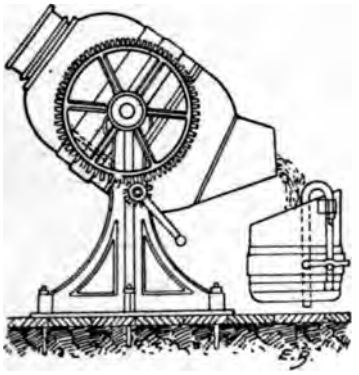
le métal dans des lingotières placées au-dessous. En disposant ses cornues de la sorte, Bessemer avait surtout en vue de faire circuler le métal afin que toutes ses parties fussent également attaquées par le vent.

Bientôt suivit la cornue rotative à tuyères émergentes qui, elle aussi, pivotait concentriquement à son bec de coulée et qui avait, en outre, l'avantage d'avoir sa tuyère au-dessus du bain quand on introduisait la fonte liquide ou quand on versait l'acier fondu.

On arrive enfin, vers 1858, à la cornue rotative perfectionnée ; cette forme diffère fort peu de celle qui est aujourd'hui adoptée dans presque toutes les intallations *Bessemer*.

Bien des difficultés pratiques restaient à surmonter au point de vue de l'élaboration du métal lui-même ; aussi les critiques et les négations des savants parurent-elles justifiées pendant quelque temps, puisque le silence se fit tout à coup sur les recherches de l'inventeur. C'est que Bessemer ne pouvait ni oxyder S et Ph contenus dans les fontes anglaises assez impures qu'il employait, ni enlever du produit final l'oxyde de fer qui se formait pendant l'opération.

Heureusement M. Granson, maître de forges suédois, eut l'idée d'appliquer ce procédé dans son pays, et le 5 janvier 1859, commença



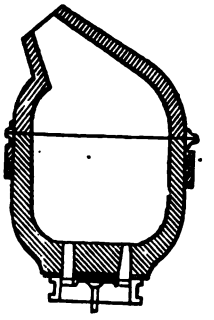


Fig. 104 et 105. — Cornue rotative perfectionnée (1858).

à traiter dans un convertisseur des fontes au bois suédoises. Le procédé réussit et s'étendit assez rapidement dans ce pays ; les convertisseurs employés furent tout d'abord fixes et à tuyères latérales, ils constituèrent le type *Suédois*.

Le métal qu'obtenait *Bessemer*, surchargé d'oxyde de fer, restait

sans corps, il ne pouvait que difficilement supporter le martelage ou le laminage et il se produisait des criques si nombreuses dans le travail à chaud qu'on se demandait si jamais le succès serait possible, lorsqu'on attribua, avec raison, à la pureté et à la richesse en manganèse des fontes traitées la réussite du procédé en *Suède*.

Robert Mushet, qui avait déjà travaillé la fabrication d'alliages carburés de fer et de manganèse, eut l'idée de communiquer au métal Bessemer quelque amélioration en ajoutant dans le convertisseur une certaine proportion de spiegeleisen d'*Allemagne*. L'effet fut merveilleux, le métal cessa d'être rouverin, il se martelait ou se laminait aisément, sans qu'il se produisît de gerçures.

Qu'on marchât *sans spiegel* comme en *Suède*, parce que les fontes traitées étaient suffisamment riches en manganèse, ou qu'on marchât avec *addition du spiegel* comme en *Angleterre*, le succès du procédé Bessemer était assuré.

En 1859, les premiers aciers Bessemer parurent sur le marché et purent être vendus à un prix inférieur au cours. Il n'y avait plus à nier l'évidence ; aussi, se résignant à acheter des minerais purs d'*Algérie* et d'*Espagne*, les industriels anglais se décidèrent-ils à adopter le procédé Bessemer.

Quant à l'explication du rôle du manganèse, elle trouvera sa place lors de l'étude théorique du procédé : on s'en préoccupa fort peu à l'époque. Bessemer avait été si bien convaincu du rôle important qui incombait au manganèse qu'il prenait en 1861 un brevet pour la fabrication d'un alliage de *manganèse*, *fer* et *silicium* auquel il donnait le premier le nom de *ferro-manganèse* et qu'il destinait à remplacer l'addition de spiegel.

Le ferro-manganèse de *Bessemer* était fabriqué au creuset par un mélange intime de fonte en grenailles, d'oxyde de manganèse, de verre pilé (fondant siliceux) et de charbon de bois en poudre, ainsi qu'il a été antérieurement expliqué lors de l'étude spéciale du ferro-manganèse. Le métal obtenu avait 60 0 0 de manganèse et très peu de silicium; son prix fort élevé fut un obstacle à sa vulgarisation ; il resta inconnu sur le continent. L'industrie dut se contenter, pendant de longues années, d'utiliser les spiegeleisen dont la teneur en Mn ne dépassait pas 10 à 12 0 0. Nous verrons plus tard dans quel but *Bessemer*, et avec lui de nombreux métallurgistes, s'ingéniaient à pouvoir fabriquer des fontes manganésées à très forte teneur en manganèse.

ticle 2. — Convertisseur et usine bessemer.

1. Le convertisseur Bessemer.

nvertisseur proprement dit. — C'est une sorte de vaste
très court ayant au minimum 1 m. 50 de diamètre extérieur
mètres de hau-
loppe est consti-
plaques de tôle
l'épaisseur envi-
ées à boulons et
intérieurement
de 25 à 30 cm.
gileux très ré-
tement damé ou,
nt, d'une épais-
ues superposées

tisseur est sup-
ieurement par
fer munie de
ns reposant sur
n fonte.

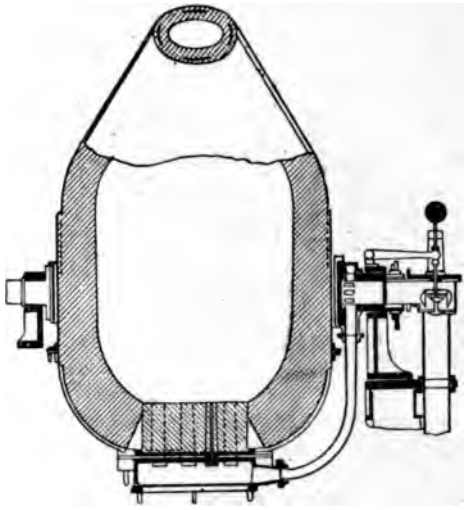
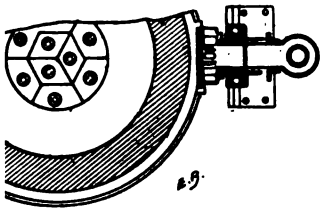


Fig. 106. — Convertisseur Bessemer vu de face (dispositif d'arrivée du vent).

leux tourillons est creux, il sert de conduit au vent : il
à cet effet d'un côté avec la machine soufflante, de l'autre
au moyen d'un tuyau recourbé avec le fond du convertisseur formant *boîte à vent.*



onvertisseur. — Coupe au niveau des tourillons.

L'autre tourillon est plein et porte un pignon engrenant avec une crémaillère fixée à l'extrémité horizontale d'un cylindre hydraulique.
peut ainsi prendre un mouvement de rotation autour de
deux tourillons.

B. — *Boîte à vent et tuyères.* — La boîte à vent est la partie délicate de la cornue ; située à sa partie inférieure, elle est reliée à son armature par des boulons à clavettes faciles à manœuvrer.

Elle sert de réservoir au vent sous pression qui lui est amené du tourillon creux ; de là, le courant d'air se distribue dans le bain de fonte par un très grand nombre de petits canaux parallèles ménagés dans des organes spéciaux appelés *tuyères*.

Chaque tuyère se compose d'un tronc de cône ou de pyramide moulé en terre réfractaire à la façon des briques, et percé d'une série de conduits cylindriques (de 6 à 12 environ) ayant à peu près un centimètre de diamètre. Ces tuyères au nombre de 6 à 20, réunies en une seule masse à l'aide d'un pisé réfractaire de 50 à 70 cm. d'épaisseur analogue à celui qui forme le garnissage latéral, constituent le fond de la cornue.

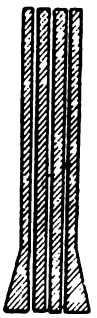


Fig. 108.

Le nombre des canaux amenant l'air dans le convertisseur varie entre 100, 150, 200 et même davantage.

Les tuyères constituent un point faible pour l'appareil : refroidies d'un côté par le courant d'air, chauffées de l'autre à très haute température par le bain de fonte, elles se désagrègent et fondent facilement.

Si une tuyère devient défectueuse on la bouche avec une balle d'argile. On peut ainsi boucher jusqu'à quatre ou cinq tuyères en cours de travail.

Lorsque plusieurs d'entre elles sont réduites à une faible épaisseur, on les enlève à coups de masse et on les remplace par des tuyères neuves en lutant de nouveau les joints avec du ciment réfractaire. Mais ce mode d'opérer est long et pénible ; il entraîne des interruptions prolongées, car le travail ne peut recommencer qu'après dessiccation au moins partielle du mastic nouveau.

C. — *Fonds mobiles.* — Il vaut mieux préparer par avance un certain nombre de fonds mobiles ; on en substitue un en entier au fond dégradé, au lieu de remplacer isolément les tuyères usées. C'est en *Amérique* qu'on a pour la première fois fait usage des fonds mobiles : cette innovation a permis d'augmenter le nombre d'opérations par 24 heures. Le fond est boulonné à la boîte à vent qui est elle-même boulonnée à la

: les boulons sont à clavette pour que le montage et le démon-
e fassent rapidement.

fonds de rechange sont torréfiés avec soin dans une étuve,
e les moules pour fon-
en sable recuit.

peut d'ailleurs adop-
ux modes généraux de
ation : fixer les tuyères
un massif de pisé battu
109); ou bien remplir
ntervalles de briques
es A, B, C, préalable-
cuites et rejointoyer
t à l'aide d'un coulis
taire (fig. 110 et 111).
dernier mode exige une
n moins longue mais
un fond moins homo-

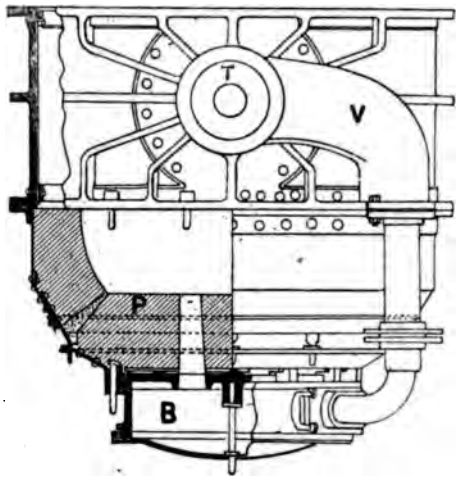
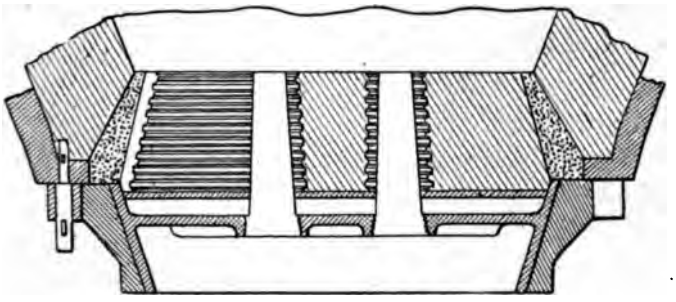


Fig. 109. — Cornue Bessemer avec fond mobile en pisé recuit (le bec étant enlevé).

B, Boîte à vent. — *P*, Fond en pisé. — *T*, Tourillon. *V*. Conduite du vent soufflé

ssemblage du fond et
boîte à vent se fait à
ture de la cornue (fig. 110), ou bien on boulonne la boîte à vent
d et celui-ci à la cornue (fig. 109).

squ'un fond nouveau doit être mis en place, on enduit de ciment



g. 110. — Fond mobile formé de briques moulées jointoyées par du pisé. — Coupe *M N O P Q* de la figure 111.

taire sa surface tronconique et on le presse ensuite comme un
on dans l'emplacement qui lui est réservé. Après cela, on achève

de luter le joint en y bourrant fortement du dehors du ciment réfractaire en pâte ferme. Cette opération peut se faire tandis que la cornue est encore incandescente, de sorte que le remplacement d'un fond s'opère facilement en moins de deux heures, après quoi le travail peut être repris sans autre arrêt.

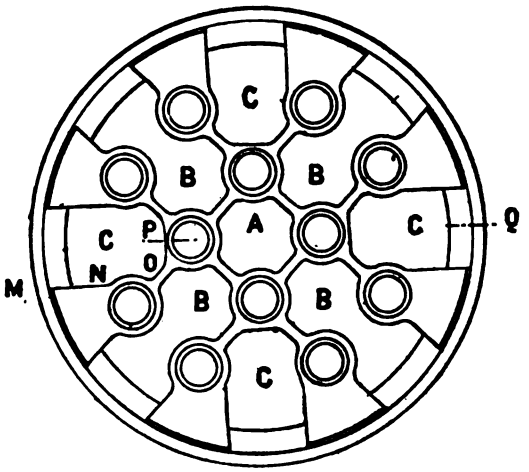


Fig. 111. — Cornue Bessemer. — Plan.

Les dimensions des convertisseurs dépendent des charges qui sont de 5, 7 à 10 tonnes et même plus, ceux de 5 à 6 tonnes sont les plus ordinaires.

Le haut de la cornue se termine en forme de col ou de bec légèrement infléchi suivant un plan normal à l'axe de rotation, ce qui facilite le chargement et la coulée et permet de diriger les flammes et les produits gazeux de l'affinage sous la hotte d'une cheminée d'évacuation, élevée à demeure au-dessus de l'appareil.

II. — *Usine Bessemer*

Une usine *Bessemer* comprend, en général, une ou plusieurs paires de cornues conjuguées.

Auprès des deux cornues est une poche de coulée, grand récipient en tôle de fer garni intérieurement de terre réfractaire, destiné à répartir entre les récipients l'acier sortant de l'un ou de l'autre des convertisseurs conjugués. Cette poche de coulée est portée par une puissante grue hydraulique qui se compose d'un fort plateau horizontal en fonte ou en tôle, fixé en son milieu sur un arbre pouvant se mouvoir verticalement comme un piston plongeur sous l'action de l'eau comprimée.

Opposée à la poche de coulée et à l'autre extrémité du plateau horizontal se trouve une forte masse servant de contrepoids.

Un mécanisme simple permet de faire tourner horizontalement tout

le système autour de l'arbre vertical, de façon à pouvoir amener successivement la poche de coulée au-dessus des récipients (1) métalliques ou réfractaires dans lesquels on doit verser l'acier sortant des convertisseurs.

Les cornues conjuguées peuvent se trouver l'une par rapport à l'autre dans deux positions différentes.

Dans l'arrangement recommandé par *Bessemer* lui-même et généralement adopté dans les usines d'*Europe*, les deux cornues sont en *face l'une de l'autre* et la fosse de coulée est réduite à une demi-circonférence.

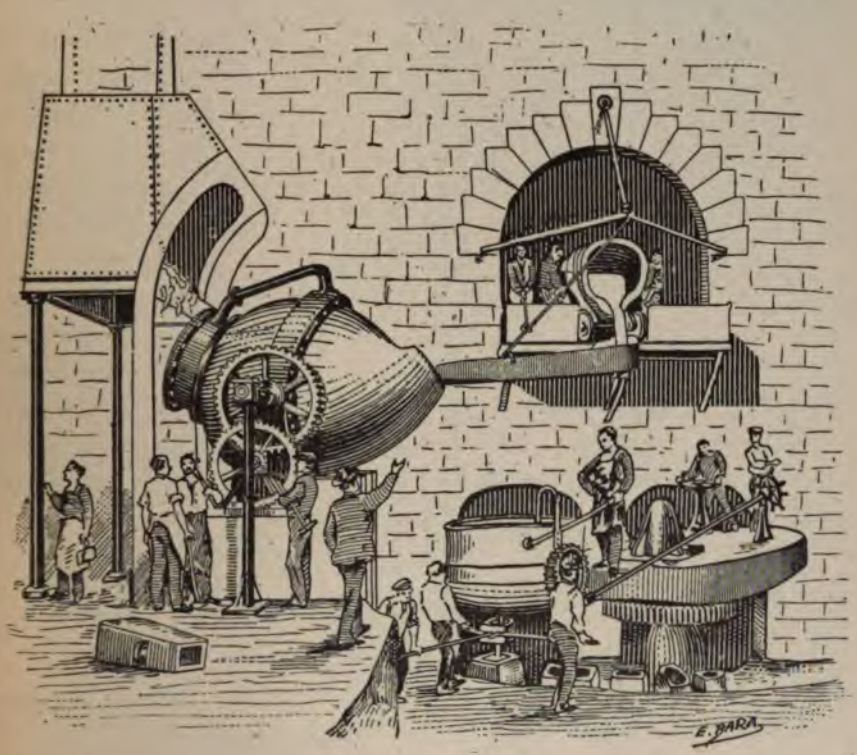


Fig. 112.

(1) Ces récipients, de formes généralement simples, prennent le nom de *lingotières;* le métal qu'on en retire après le refroidissement s'appelle *lingot*. Quand ces récipients sont constitués en matériaux réfractaires et donnent, de par leur forme appropriée, l'objet lui-même à fabriquer sans qu'il soit besoin de le façonner à chaud, ils prennent le nom de *moules*.

Dans les nouvelles aciéries américaines, on place les cornues pa lèlement et peu éloignées l'une de l'autre ; la fosse de coulée se comp alors d'un cercle presque entier et les trois quarts en sont libres p le maniement des récipients destinés à recevoir l'acier. Dans la plu des usines, le mouvement de rotation des convertisseurs s'obtient l'eau sous pression agissant sur un piston couché dont la tige hori tale prolongée en crémaillère actionne directement le pignon-tour de la cornue. L'autre tourillon, qui est creux, ouvre et ferme co

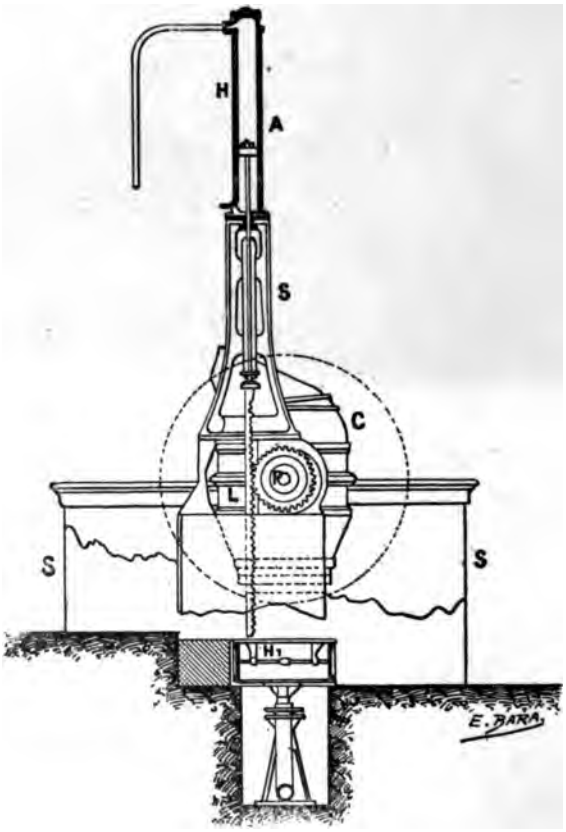


Fig. 113. — Bessemer à crémaillère verticale.

S, bâti général de l'appareil. — *H*, cylindre hydraulique dans lequel se meut le p *A*, qui donne le mouvement à la crémaillère *L*, au pignon *P*, et, par suite au conv seur Bessemer *C*. — H_1, chariot supporté sur un cylindre hydraulique et serv changer les fonds de l'appareil Bessemer.

un robinet le passage du vent. En couchant la cornue horizontalem

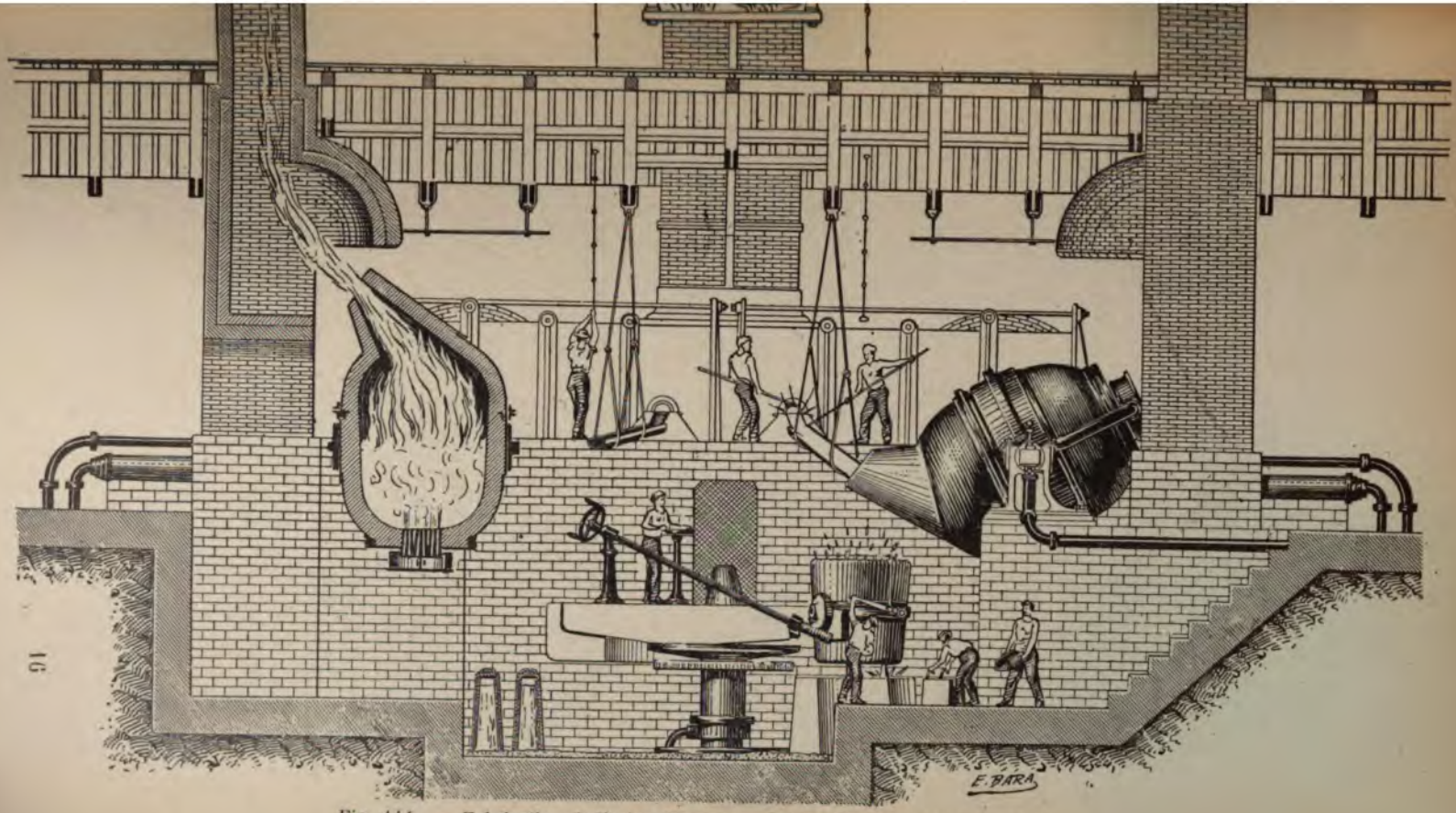


Fig. 114. — Fabrication de l'acier Bessemer. — Vue d'ensemble des appareils.

le vent cesse d'y arriver ; en la relevant, on rétablit la communication entre la boîte à vent et la machine soufflante.

On rencontre aussi des Bessemer à crémaillère verticale quand l'espace dont on dispose dans l'atelier est limité. La figure (page 240) suffit pour faire comprendre le dispositif employé.

Pour la conduite générale d'une opération Bessemer, le contremaître qui en est chargé se tient derrière une table d'où il peut apercevoir tout son atelier. Il a sous la main trois manivelles : avec la première il règle l'introduction du vent dans le convertisseur, avec la deuxième il transmet la pression hydraulique sur une des faces du piston dont la tige porte la crémaillère qui fait basculer l'appareil, avec la troisième il commande la grue hydraulique qui porte la poche de coulée.

A un niveau supérieur à celui des cornues se trouvent souvent des cubilots destinés à fournir la fonte à affiner quand on marche en deuxième fusion, ce qui n'est pas le cas général. Par cette disposition, on évite les monte-charges hydrauliques ou autres et la fonte est directement versée dans les convertisseurs à l'aide d'un chenal garni de terre réfractaire.

On peut voir sur l'une des figures précédentes le chargement de la cornue par une poche de coulée portée par un wagonnet roulant sur rails et amenant directement la fonte coulée du haut-fourneau. Cette poche de coulée arrive au niveau convenable, soit par un plan incliné à l'aide de dispositifs mécaniques à crémaillère, soit par un monte-charges disposé à cet effet.

Enfin, on rencontre aussi au niveau des cubilots des fours à réverbère destinés à refondre, le cas échéant, les fontes additionnelles qui serviront de réactif dans l'élaboration de l'acier.

Pour une paire de convertisseurs pouvant traiter chacun n tonnes de fonte, on emploie, afin de ne pas manquer de vent, deux machines soufflantes ordinairement accouplées, capables d'aspirer chacune par minute 25 à $30 \times n$ mètres cubes d'air à la pression atmosphérique et de les envoyer dans le convertisseur à une pression variant de 114 cm. à 152 cm. de mercure.

Le vent doit avoir, à son arrivée, une pression suffisante pour vaincre la résistance due à la hauteur du bain de fonte au-dessus des orifices des tuyères, le frottement à l'intérieur des tuyères, etc...

En général, la puissance de la soufflerie est de 60 chevaux par tonne de fonte chargée dans les convertisseurs.

Art. 3. — Marche d'une opération jusqu'a l'arrêt

ımme on l'a dit plus haut, la fonte à affiner peut venir du haut-ıeau, du cubilot ou du four à réverbère.

ı point de vue de l'économie, il y a intérêt à marcher en première n, cependant au point de vue non pas de la qualité (car au haut-ıeau on peut avoir d'excellents produits), mais de la régularité ›roduits, on devra donner la préférence au cubilot ou au four à rbère.

ı *France*, en *Angleterre* et en *Allemagne* où le coke est assez abon-, on ne craint pas de recourir au cubilot, mais il y a une tendance lus en plus marquée, depuis quelques années, à marcher en pre-e fusion.

est aux usines de Terrenoire en 1867 que fut inaugurée la marche essemer, avec une fonte venant directement du haut-fourneau.

ans les régions où le coke est trop cher et où l'on tient cependant ırcher en deuxième fusion, la fonte peut être fondue sur la sole four à réverbère avant d'être versée dans le convertisseur.

vant d'introduire la fonte, on chauffe le convertisseur au rouge c en y brûlant du coke sous l'action d'un vent léger.

uand il est chaud on verse, en le retournant, le coke qu'il contient n le place dans une position horizontale, le bec en dessus pour ›n puisse y introduire la charge. Celle-ci peut se loger dans la vaste se de la cornue sans pénétrer dans les tuyères et n'occupe qu'une tion relativement faible du vide total de l'appareil.

n redresse le convertisseur en donnant en même temps le vent pour la fonte, au moment du relevage, ne pénètre pas dans les trous des res.

'affinage commence aussitôt sous l'action des filets d'air comprimé traversent le bain métallique. Il se termine après 30 minutes au imum et se divise en trois périodes qu'on peut assez nettement inguer et dont la durée relative est du reste fort variable, suivant ature des fontes traitées. Ces trois périodes sont :

'). — *Période de scorification ou des étincelles* (formation d'oxydes

2°). — *Période de décarburation ou des flammes* (formation de CO et CO^2).

3°). — *Période des fumées* (combustion du fer).

I. — *Période de scorification.*

On reconnaît dans la cornue *Bessemer*, comme au puddlage chaud, une première période relativement paisible où l'oxygène de l'air forme surtout des oxydes fixes.

Le *silicium*, qui est l'élément le plus oxydable de la fonte, brûle le premier, il se forme de la silice qui, étant un produit solide, ne donne lieu à aucune flamme.

Au bec de la cornue, il y aura un courant gazeux formé d'azote mêlé d'étincelles rouges et blanches dues aux globules scoriacés et métalliques entraînés par le vent.

Pendant cette période, Mn s'oxyde mais en faible proportion et C ne brûle presque pas. Si on retirait alors le métal de la cornue, on aurait une fonte dure et cassante (*fonte blanche*).

Le bruit qui caractérise cette phase de l'opération est souvent très intense et sourd; peu à peu il diminue car le métal, plus échauffé et par suite plus fluide, se laisse plus facilement traverser par le vent; la machine s'accélère et lance plus de vent.

La durée de cette période, variant de 4 à 12 minutes, est *proportionnelle à la teneur en Si* de la fonte traitée; cependant elle dépend aussi de la teneur en Mn : ce dernier élément, quoique agissant surtout sur la durée de la deuxième période, peut prolonger légèrement la première.

II. — *Période de décarburation.*

Le passage de la première à la deuxième période, soit à celle qui est surtout caractérisée par la combustion du carbone, est assez brusque et ne dure que 2, 3 ou 4 minutes. L'oxydation du manganèse s'achève; si ce métal est en trop forte proportion, il y a production de fumée et, quoique le carbone commence à brûler, il y a ralentissement dans sa combustion.

Mais bientôt, au bec de la cornue, on voit une flamme jaune orang

avec stries rouges et bleues qui grandit, blanchit et finit par être longue et brillante. Les étincelles disparaissent ou du moins sont devenues plus fines et sortent en traînées continues. C'est le carbone qui, sous l'action de l'oxygène de l'air bien plus que sous celle de l'oxyde de fer produit toujours plus ou moins dès le début de l'opération, brûle en donnant CO^2 et surtout CO à mesure que l'opération s'avance; aussi la flamme devient-elle de plus en plus vive.

Le dégagement des gaz carburés fait monter, bouillonner et quelquefois déborder la masse fluide, surtout quand on traite des fontes froides ou plus généralement des fontes manganésées désignées souvent dans les ateliers Bessemer sous le nom de *fontes légères ;* dans ce cas, les projections de scories et de métal fondu sont très tumultueuses. Les gaz qui sortent avec pression du bec de l'appareil produisent un bruissement sifflant caractéristique.

Quant à l'intensité lumineuse de la flamme, elle provient de la *haute température* des gaz en combustion.

La durée de cette période dépend de la teneur en carbone et varie de 15 à 19 minutes, soit dans des limites moins étendues que celles de la première période.

III. — *Période des fumées.*

A mesure que C disparaît l'intensité elle-même s'affaiblit, la flamme passe du blanc éblouissant au blanc rosé et le bruit du vent redevient sourd parce que la masse métallique oppose plus de difficulté au passage du vent et aussi parce que le volume des gaz est moindre.

Il se dégage ensuite de l'appareil une fumée abondante, d'abord blanche, puis rouge, déposant une poussière très fine de peroxyde de fer mêlé de silice et d'oxyde de manganèse. C'est le fer qui brûle.

Tandis que le silicium et le manganèse s'oxydent dans la première période, que le manganèse finit de s'oxyder et que le carbone s'oxyde dans la deuxième période, le fer s'oxyde surtout dans la troisième période, c'est-à-dire après le départ de la plus grande partie du carbone. Il importe toutefois de ne point oublier que ce métal, par suite de sa forte proportion dans la masse fluide, s'oxyde un peu pendant toute l'opération.

La troisième période devra être aussi courte que possible.

Dans le cas où l'on traite des fontes très siliceuses, il reste du silicium jusqu'à la fin de l'opération et l'on attribue, en général, à ce silicium la mauvaise qualité des aciers obtenus en allure extra-chaude au Bessemer acide.

La durée de la troisième période ne doit pas dépasser 2 ou 3 minutes.

On peut terminer l'opération quand il n'y a plus dans le bain qu'une quantité déterminée de carbone, soit celle que l'on recherche pour la dureté de l'acier en élaboration. On réalise dans ce cas la marche dite *sans spiegel ;* cette manière d'opérer n'est praticable que dans les régions où, comme en *Autriche* et en *Suède,* on dispose de fontes essentiellement pures et riches en manganèse, sinon le métal obtenu renferme des quantités plus ou moins grandes d'oxyde de fer qui le rendent à peu près impropre à tout travail mécanique de transformation.

Dans le cas général, on arrête l'opération quand on juge que la décarburation est complète, c'est-à-dire au moment où la flamme a à peu près complètement disparu au col de la cornue. On dit à ce moment que le *bain est à l'arrêt.*

On abaisse alors le convertisseur de façon que son axe soit horizontal, on arrête l'arrivée du vent et on ajoute dans l'appareil un réactif destiné à désoxyder le bain d'acier.

Mais comme ce réactif est une fonte, on introduira forcément du carbone dans le bain à désoxyder. Il y aura donc lieu de savoir comment, tout en désoxydant le bain par un des corps étrangers contenus dans cette fonte spéciale, on ajoutera néanmoins la quantité de carbone voulue pour recarburer le bain à la dose requise.

C'est ce que nous allons expliquer.

Article 4. — Du réactif employé pour désoxyder le bain

Le réactif employé pour désoxyder le bain est une fonte manganésée: *spiegel* ou *ferro-manganèse* selon le cas. Nous ne saurions mieux faire, pour exposer avec clarté cette question capitale, que d'avoir recours aux travaux de M. *Ferd. Gautier* sur les alliages ferro-métalliques où elle s'y trouve magistralement traitée.

A. — *Les explications de M. Valton.* — C'est à M. Valton, ingénieur en chef des Aciéries de la Cie de Terrenoire, que revient l'honneur

d'avoir *le premier* donné une explication rationnelle du rôle joué par le manganèse dans l'addition finale de l'opération Bessemer. Voici ce qu'écrivait cet éminent ingénieur dans le Bulletin de la Société de l'industrie minérale, en 1866 :

« On peut affirmer :

« 1° Qu'il est possible, avec des fontes convenables, de faire de l'a-
« cier directement, c'est-à-dire d'arrêter l'affinage au point où le métal
« renferme la quantité de carbone voulue, etc...

« 2° Qu'il est plus commode, dans la pratique, de pousser l'opéra-
« tion jusqu'à la combustion complète de C et de rendre au métal la
« quantité convenable de cet élément par l'addition d'une petite quan-
« tité d'une fonte connue.

« 3° Qu'il est utile que cette fonte contienne Mn ou un autre corps qui,
« à la haute température du bain, ait une très grande affinité pour l'oxy-
« gène, sans d'ailleurs qu'un excès de ce même corps soit nuisible à l'a-
« cier. C'est là le rôle de Mn.

« J'ai dit en effet, plus haut, qu'à toutes les époques de l'opération,
« le métal converti est saturé d'oxyde de fer; en présence de C, cet
« oxyde se réduit en protoxyde et passe dans la scorie; lorsque, au
« contraire, C a disparu, le peroxyde continue à se former sans qu'au-
« cun agent réducteur soit en présence. Si à ce moment, on ajoute du
« Mn métallique, celui-ci s'empare d'une partie de l'oxygène du fer;
« il se forme deux protoxydes qui passent dans la scorie et le métal est
« purifié.

« C *agirait de la même façon*, mais avec production de gaz et explo-
« sions. Si Mn n'est pas le seul corps qui puisse remplir ce rôle, il est,
« pour le moment, le moins cher et le plus commode.

« Le spiegeleisen remplit donc un double but, *il désoxyde* et il
« *recarbure.* »

Telle est l'explication scientifique acceptée si difficilement à l'époque, discutée pendant longtemps et confirmée aujourd'hui. Mais si les polémiques concernant le *rôle réducteur* du manganèse ont pris fin, il n'en est pas de même de celles qui ont trait à la nature même de l'oxyde de fer existant dans le bain d'acier et que l'addition finale fait disparaître.

Le fer existe-t-il dans le bain à l'état de FeO ou d'oxyde supérieur, ou bien ces deux oxydes y sont-ils mélangés et dans quelle proportion? Nous pensons qu'il est difficile d'apporter à ces questions une réponse satisfaisante, étant donné la difficulté d'expérimenter à ces hautes tem-

pératures, d'une part, et l'incertitude actuelle des méthodes de dosage des oxydes de fer, d'autre part.

M. *Valton*, qui avait si nettement donné l'explication scientifique du rôle de Mn dans l'addition finale de spiegel, avait remarqué aussi qu'il y avait forcément une certaine relation entre la *réduction* de l'oxyde de fer en dissolution et la recarburation produite par le C du spiegel.

Avec un spiegel à 8 0/0 de Mn et 5 de C, par exemple, quand on ajoutait dans le bain 1 de Mn, ou introduisait en même temps $\frac{5}{8}$ ou 0,60 de C environ.

Donc si on voulait faire des aciers doux se rapprochant du fer, il fallait remplacer le spiegel par quelque autre alliage de fer et de Mn n'ayant pas plus de C, mais beaucoup plus riche en Mn.

M. *Valton* écrivait à peu près à la même époque :

« Il n'est pas douteux, d'un autre côté, que le spiegel ne puisse être et « ne soit déjà remplacé par des produits plus ou moins analogues, plus « ou moins riches en Mn ; il n'est pas douteux, non plus, que le rôle de « ce dernier métal étant chaque jour mieux compris, il ne se crée d'ici « peu des procédés de fabrication véritablement industriels et que la « métallurgie n'entre prochainement en possession d'un nouveau métal « doué de propriétés les plus utiles. »

On apprit bientôt aux usines de *Terrenoire* que des essais de fabrication de métaux manganésés avaient été entrepris en *Angleterre*.

Nous avons déjà dit que Bessemer avait réalisé au creuset un Fe-Mn fort coûteux ; voulant faire mieux, il se rendit à *Glasgow* où l'on traitait de grandes quantités de peroxyde de Mn pour la production de Cl et s'entendit avec le chimiste *Henderson* pour essayer de fabriquer en grand des Fe-Mn avec les résidus manganésifères de cette fabrication. Nous avons fait allusion à ce procédé lors de l'étude des ferro-manganèses. Les aciéries, après avoir essayé ces fontes si riches en Mn, n'en comprirent pas tout l'avantage. Seule, la compagnie de Terrenoire continua à utiliser les fontes riches en manganèse qu'elle achetait à *Henderson* et lorsque celui-ci cessa cette fabrication elle put, après une entente commerciale, exploiter le procédé certainement fort coûteux, mais si fécond pour l'élaboration des aciers au convertisseur.

Les choses en étaient là lorsque M. *Forey* put réaliser aux usines de Montluçon un Fe-Mn à 26 0/0 de Mn ; dès lors la fabrication de ces

fontes devint industrielle et leur emploi se répandit rapidement dans les aciéries.

Malgré les explications si nettes données en 1866 par M. Valton, l'accord ne se fit guère que vers 1876 sur le rôle réducteur du manganèse à la fin de l'affinage. Nous nous écarterions trop de notre sujet si nous développions les théories émises à l'époque à propos de l'action du manganèse.

Nous supposerons donc admise sans aucun doute l'absorption de l'oxygène par le manganèse métallique.

B. — *Pratique de l'addition de manganèse.* — Il est reconnu *par la pratique* que, pour désoxyder un bain d'acier, il faut en moyenne 1 0/0 de manganèse métallique, ce qui veut dire que, dans une cornue contenant 10 tonnes d'acier, il faudra ajouter 100 kilos de manganèse métallique.

Donc si l'on dispose d'un spiegel à 10 0/0 de Mn il faudra ajouter dans le convertisseur 100 kilos de ce spiegel pour désoxyder le bain.

Mais il n'est pas indifférent, pour ajouter le manganèse nécessaire à la désoxydation, de partir d'une fonte manganésée quelconque à cause du rôle forcément carburateur de cet alliage.

Les fontes manganésées ont en effet une teneur en carbone oscillant entre 4 à 7 0/0 ; cette teneur peut être considérée comme sensiblement constante si on la compare à la teneur en Mn qui oscille entre des limites très étendues.

Comme la quantité de manganèse métallique à ajouter pour désoxyder un bain ne dépend que du poids de ce bain, ainsi que la pratique nous l'apprend, on voit tout de suite que « *le métal obtenu renfermera d'autant moins de carbone et sera par suite d'autant plus doux que le manganèse ajouté proviendra d'un alliage plus riche en Mn.* »

Il en résulte qu'on pourra fabriquer les aciers durs à l'aide des spiegels, les aciers très doux à l'aide des ferro-manganèses riches et les aciers intermédiaires par un choix judicieux dans l'échelle si étendue des ferro-manganèses d'après leur teneur en Mn.

L'emploi du ferro-manganèse riche s'est étendu de plus en plus à cause de la nécessité d'avoir un métal fondu se rapprochant autant que possible du fer et présentant sur l'ancien fer puddlé le double avantage de pouvoir être obtenu en grande masse et dans un état d'homogénéité bien supérieur.

On peut procéder à l'addition finale en incorporant le spiegel ou le Fe-Mn au bain d'acier lui-même ou procéder directement à la coulée en versant le métal dans la poche de fonderie où l'on aura préalablement placé la fonte d'addition. Celle-ci peut être introduite froide, chauffée au rouge ou bien amenée à l'état liquide.

Généralement le Fe-Mn n'est pas refondu, car à la fusion il donne un trop grand déchet par oxydation du Mn ; or cette fonte spéciale est d'un prix assez élevé. S'il est pulvérisé, chauffé au rouge en vase clos, il peut être ajouté soit dans le convertisseur, soit dans la poche de coulée. Dans ce dernier cas, on peut réduire à 0,75 0/0 la quantité de Mn nécessaire pour désoxyder le bain ; car, d'une part l'action de Fe-Mn réduit en poudre est beaucoup plus efficace et d'autre part, introduit dans l'acier sans qu'il soit en contact avec la scorie, il n'y a pas de déchet de Mn par désoxydation partielle de cette scorie.

Le spiegel moins riche en Mn intervient en plus grande quantité, il doit être introduit liquide sous peine de trop refroidir la charge. Quand on introduit la fonte manganésée dans le convertisseur, on ne le relève plus comme autrefois, dès l'addition terminée, en lançant le vent pour assurer le mélange du réducteur avec la masse liquide. Cette manière d'opérer a été abandonnée parce que ce soufflage oxydait toujours un peu C et Mn, forçait à augmenter la dose du métal réducteur et rendait plus incertaine l'obtention de tel ou tel produit. Maintenant la cornue reste horizontale pendant la réaction de la fonte manganésée, réaction qu'on appelle souvent le raffinage, comme on l'a dit antérieurement.

Quelquefois on procède à des additions simultanées de spiegel et de Fe-Mn ; dans ce cas, le spiegel est introduit fondu dans la cornue, le Fe-Mn réduit en morceaux assez petits et chauffé au rouge est placé avant la coulée dans la poche de fonderie.

Pour procéder à la coulée du métal désoxydé ou non, ce qui dépend de la façon dont on veut pratiquer l'addition, on incline le convertisseur pour verser le métal dans la poche de coulée.

Cette poche de coulée en tôle rivetée garnie, intérieurement de terre réfractaire, a été chauffée préalablement au rouge blanc.

Elle est percée au fond d'un trou de coulée de 4 à 5 centimètres de diamètre, obturé par un dispositif qu'il n'y a pas lieu de décrire ici.

Quoiqu'il semble, d'après les considérations exposées plus haut, qu'on puisse fabriquer à son gré des aciers de toutes nuances par rapport à la teneur en carbone, en choisissant dans l'échelle des spiegels

et des Fe-Mn la fonte manganésée convenable, nous devons néanmoins ajouter que la fabrication des aciers extra-doux, véritables fers fondus, est à peu près impossible à réaliser au *Bessemer acide*. Cela provient de la présence presque forcée d'une certaine quantité de Si dans le bain d'acier affiné ; on verra plus loin qu'il y a nécessité de traiter par ce procédé des fontes riches en ce métalloïde, or, il est à peu près impossible d'arriver à son élimination complète en fin d'affinage.

Pour être sûr d'ajouter assez de Mn métallique en vue de réduire l'oxyde de fer on en ajoute un excès. Cet excès de Mn, quand il ne dépasse pas quelques millièmes, ne semble pas nuisible.

C. — *De la teneur en certains éléments des spiegels et des ferromanganèses.* — Il ne suffit pas qu'on traite des fontes de qualité requise au Bessemer acide, il faut encore que les fontes d'addition ne viennent pas apporter au bain d'acier des éléments nuisibles.

Du phosphore et du silicium se trouvent forcément dans ces alliages qui sont produits à une allure éminemment réductrice et à température élevée. Voici d'après M. Ferd. Gautier la solution de la question.

1° — *Teneur en phosphore.* — Voyons tout d'abord la teneur en phosphore qu'on pourra tolérer dans ces fontes, sans qu'il y ait inconvénient pour la qualité de l'acier sur lequel elles doivent réagir.

On admet qu'une quantité de Ph inférieure à $\frac{1}{1000}$ contenue dans un acier doit être pratiquement regardée comme inoffensive.

Supposons, par exemple, du Fe-Mn à 80 0/0 ; puisqu'il faut 1 0/0 au plus de Mn métallique pour désoxyder le bain, on ajoutera $\frac{1}{80}$ de Fe-Mn et si on appelle x sa teneur en Ph il faut que l'inégalité :

$\frac{1}{80}x < \frac{1}{1000}$ soit satisfaite pour que l'addition n'augmente pas d'une quantité dangereuse la teneur en Ph du bain d'acier. D'où, x devra être inférieur à $\frac{8}{1000}$.

S'il s'agit de spiegel à 20 0/0 de Mn, il faudra en ajouter 4 fois plus que de Fe-Mn à 80 0/0 ; donc pour n'introduire que la même quantité de Ph, la teneur du spiegel en Ph devra être 4 fois plus faible : il ne devra contenir que $\frac{2}{1000}$ de Ph.

La règle pratique adoptée dans les transactions commerciales pour les alliages de Mn est la suivante :

« Pour 20 0/0 de Mn : $\frac{1}{1000}$ de Ph, et pour 10 unités de Mn en plus : « $\frac{2}{10000}$. »

Il en résulte que du Fe-Mn à 80 0/0 ne devrait renfermer que $\frac{1}{1000} + 6 \times \frac{2}{10000}$ ou $\frac{22}{10000}$.

Ces conditions ne sont réalisables qu'avec des minerais choisis.

2° — *Teneur en silicium.* — Quant au silicium, il résulte de ce que nous avons déjà dit au sujet de son élimination non intégrale qu'il y a intérêt à ne pas en ajouter en proportion trop forte par le fait de l'addition. On admet qu'une proportion de $\frac{5}{10000}$ de Si dans un acier est inoffensive au point de vue de la qualité.

Si y est la teneur en Si de la fonte manganésée, on devra avoir pour le Fe-Mn à 80 0/0 :

$$\frac{1}{80} y < \frac{5}{10000} \text{ ou : } y < \frac{4}{100}$$

Pour le spiegel à 20 0/0, on devra avoir :

$$\frac{1}{20} y < \frac{5}{10000} \text{ ou : } y < \frac{1}{100}$$

La règle pratique assez souvent adoptée est la suivante :

« Pour 20 0/0 de Mn : $\frac{1}{100}$ de Si et pour 10 unités de Mn en plus : $\frac{1}{1000}$. »

Il en résulte que du Fe-Mn à 80 0/0 ne devrait renfermer que $\frac{1}{100} + \frac{6}{1000}$ ou $\frac{16}{1000}$ de Si ; ce qui s'obtient assez aisément.

Il faut cependant ajouter que la tolérance en Si peut être légèrement plus forte ; car une certaine quantité du silicium de la fonte d'addition est oxydée, concurremment avec le manganèse.

Les choses paraissent, en effet, se passer ainsi quand on emploie le Fe-Mn-Si ou silico-spiegel comme fonte d'addition, ainsi qu'on le verra plus loin.

Article 5. — Détermination du point d'arrêt

Dans ce procédé de fabrication, l'affinage s'effectue si rapidement qu'on conçoit la nécessité d'avoir des moyens sûrs pour apprécier la marche de l'opération, puisque quelques secondes de soufflage en plus ou en moins font varier la composition du métal et augmentent le déchet. Il faut donc pouvoir déterminer exactement le moment où l'on doit arrêter le vent et renverser l'appareil pour effectuer le raffinage. Les procédés qui permettent de juger du degré d'avancement de l'affinage sont basés :

soit sur l'examen direct de la flamme ;
— — de la scorie ;
— l'emploi du spectroscope ;
— des essais directs d'éprouvettes.

1° — *Examen de la flamme.* — Quand dans une usine on traite toujours la même nature de fonte, on peut arriver avec une grande habitude à apprécier la fin de l'affinage par le seul aspect de la flamme sortant du convertisseur. Mais ce procédé, outre qu'il est assez peu précis, a l'inconvénient de n'être plus applicable dès que la composition des fontes traitées vient à varier.

2° — *Examen de la scorie.* — Ce procédé est surtout employé quand on opère sur des fontes très manganésées parce qu'alors la flamme du convertisseur est obscurcie par des fumées roussâtres qui ne permettent pas l'emploi du spectroscope.

On s'en sert également quand on traite des fontes de qualité connue et dont la composition varie peu.

On incline la cornue de façon à pouvoir plonger l'extrémité d'un ringard dans la couche de scories qui recouvre le métal.

La pellicule scoriacée qui s'attache au ringard est refroidie rapidement et permet de juger de la marche de l'affinage par l'examen de sa couleur qui variera avec sa teneur en oxyde de fer. Tant que le bain est carburé, la scorie a une *couleur claire ;* à mesure que C diminue dans la fonte, l'oxyde de fer augmente dans la scorie dont la couleur se fonce de plus en plus en passant du jaune au brun, puis au noir.

L'échelle des variations de couleur de la scorie ne saurait être don-

née ici car elle est fonction de la nature des fontes traitées : nous devons forcément nous borner à des indications générales.

3° — *Emploi du spectroscope.* — L'emploi du spectroscope présente sur les autres procédés cités un grand avantage qui est la continuité du phénomène à partir du moment où le spectre est bien visible.

On sait que l'analyse spectrale repose sur les principes suivants :

a) La lumière provenant d'un solide ou d'un liquide incandescents donne un spectre continu, sans raies brillantes ni obscures.

b) Quand la lumière vient d'une vapeur ou d'un gaz incandescents, le spectre est discontinu et montre une série de raies brillantes dont la nature et la position dans le spectre indiquent les éléments contenus dans la vapeur ou le gaz.

c) Si la lumière provient d'une source quelconque et traverse un gaz ou une vapeur obscure, elle donne lieu à la formation de raies ou bandes d'absorption.

Dans la 1re période de l'opération Bessemer, il sort du convertisseur des gaz : Az, H et CO^2, mais la flamme est peu abondante ; ce sont les étincelles qui dominent : aussi a-t-on un spectre continu sans raies brillantes, le spectre des particules solides contenues dans les gaz l'emporte sur le spectre du gaz lui-même.

Dans la 2e période, la flamme est brillante : on aura alors les trois spectres superposés : spectre continu, spectre à raies brillantes, spectre à bandes d'absorption, ce dernier existant quand on traite certaines fontes (fontes manganésées notamment) donnant lieu à des fumées obscures qui entourent la flamme et qui peuvent même, dans certains cas, rendre impossible l'emploi du spectroscope.

« *L'ordre d'apparition et de disparition des raies est à peu près fixe : c'est sur lui qu'on se règle pour juger de la marche de l'affinage.* »

Ce qui intéresse surtout le praticien, c'est l'ordre de disparition des raies. D'une façon générale, on remarque qu'elles s'effacent dans l'ordre inverse de leur apparition.

Le moment de l'arrêt de l'opération varie avec la nature des fontes ; on conçoit d'autre part qu'il serait sans intérêt de nous étendre sur la description détaillée des groupes de raies qu'on voit successivement apparaître ou disparaître en cours d'opération.

L'emploi du spectroscope est d'un usage facile et permet de régler avec grande certitude la marche de l'affinage ; il s'est généralisé dans toutes les aciéries Bessemer.

'est M. W. *Bradge* qui appliqua pour la première fois en 1862, z M. John *Brown* and C° de *Sheffield*, le spectroscope à la fabrica- ı de l'acier Bessemer.

I. *Valton* en 1864 en introduisit l'usage aux usines de Terrenoire. *Roscoë*, en 1863, aux usines de M. John *Brown* and C° et M. *Des-'es* à celles de Terrenoire, en 1875, ont étudié le spectre de la flamme ssemer et publié des mémoires qui font encore autorité sur la ques- ı.

° — *Essais directs du métal.* — L'essai direct du métal est tou- rs pratiqué concurremment avec l'une ou l'autre des méthodes pré- entes. Dès qu'on juge : l'affinage est assez ncé, on fait une prise de :al dans le convertisseur 'aide d'une grande cuil- : en tôle de fer garnie de :e réfractaire qu'on plonge ıs le bain d'acier.

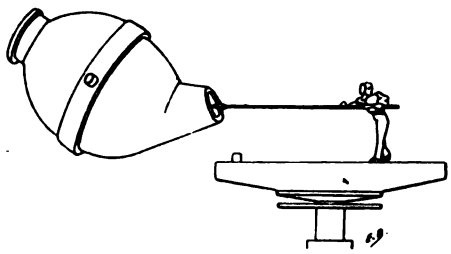


Fig. 115. — Prise de métal dans la cornue.

)n coule ce métal dans petit récipient à parois métalliques : on démoule au bout de quel- :s instants.

.e métal solidifié, mais très chaud, est porté de suite au marteau- ɔn pour y être forgé et transformé en un petit disque qu'on ploie qu'à rupture. A l'aspect du grain, on apprécie sa dureté, sa teneur C et en Mn.

Cet essai de forgeage dans lequel on a remarqué comment le métal

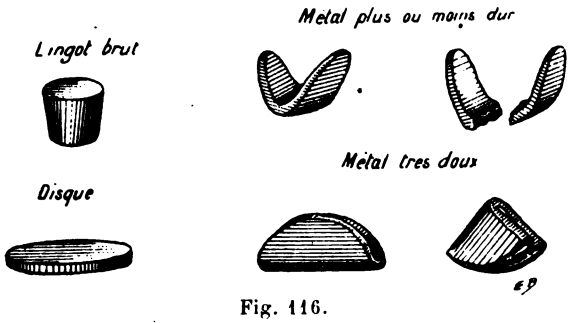


Fig. 116.

: comportait sous le choc du marteau est souvent complété par un ssai de trempe pratiqué sur un fragment de métal découpé dans le

disque après forgeage ou sur une autre prise spécialement prélevée à à cet effet. Il consiste à plonger dans l'eau froide le métal encore très chaud et à le ployer ensuite afin de le casser pour examiner le grain de l'acier.

Par cet examen des cassures on juge de la marche de l'opération et de la quantité de fonte manganésée à ajouter dans le convertisseur pour effectuer le raffinage.

On fait des essais analogues après l'addition du spiegel ou du Fe-Mn pour vérifier qu'on a bien obtenu la nuance d'acier désirée.

Quand un bain d'acier est très oxydé, les bords du disque après forgeage sont remplis de criques et de fentes à l'aspect scoriacé. — A chaque nuance d'acier correspondent des cassures sous un angle plus ou moins aigu ; quand le métal est très doux, on peut obtenir des pliages à bloc.

Article 6. — Bilan chimique et calorifique du procédé Bessemer

La succession des différentes réactions chimiques peut être étudiée en analysant aux diverses périodes de l'opération :

1° Le métal partiellement affiné et les scories qui en proviennent ;

2° Les gaz sortant de la cornue.

Pour l'établissement du bilan calorifique, il faudra comparer la chaleur produite en cours d'affinage à la chaleur absorbée (1).

I. — *Bilan chimique.*

Les produits solides (métal et scories) ont été analysés pour la première fois à l'usine de Neuberg (Styrie) en 1866, en cours de traitement de fontes au bois manganésées.

Il faut citer ensuite les analyses de M. *Snelus* à l'usine de Dowlais, en 1871, de M. *Baker* à l'usine de Sheffield, en 1871, et de M. *King* de Newport à l'usine de Bethléem (Pensylvanie) en 1880, en cours de traitement de fontes peu riches en manganèse, etc.....

Les gaz sortant du convertisseur n'ont été analysés que par M. *Snelus* en Angleterre et par M. *Tamm* en Suède.

(1) Nous renvoyons au traité de métallurgie de *Gruner* pour l'étude complète de la question ; cet article n'en contenant que les points essentiels.

us donnons ci-dessous les tableaux de ces analyses :

A. — Analyses des produits solides.

ANALYSE DU DOCTEUR KESSLER

ÉLÉMENTS	Fonte traitée.	Après 4 minutes.	A l'origine de l'ébullition.	Vers le milieu de l'ébullition.	Avant l'addition de *Spiegeleisen*.	Produit final.
Graphite	2.52	0.14	0.04	0.01	»	»
C combiné . . .	1.06	3.65	3.53	2.47	0.29	0.45
C total	3.58	3.79	3.57	2.48	0.29	0.45
Silicium	1.87	1.20	0.05	0.07	0.02	0.08
Manganèse . . .	1.04	0.23	0.08	0.06	0.05	0.34
Phosphore . . .	0.10	0.11	0.10	0.10	0.11	0.10
Soufre	0.37	0.07	0.06	0.08	0.11	0.08

ANALYSE DE M. SNELUS

ÉLÉMENTS	Fonte traitée.	Après 6 minutes. — *Fin de la 1re période.*	Après 12 minutes. — *Avant la fin de l'ébullition.*	Avant l'addition de *Spiegeleisen*.	Produit final.
Graphite.	2.07	—	—	—	—
C combiné.	1.20	2.17	1.55	0.10	0.57
C total.	3.27	2.17	1.55	0.10	0.57
Silicium.	1.95	0.79	0.63	0.02	0.03
Manganèse.	0.09	traces	—	—	0.30
Phosphore.	0.05	0,05	0.06	0.07	0.05
Soufre.	0.01	traces	—	—	—

ANALYSES DE M. KING

(a) Métal

ÉLÉMENTS	Fonte traitée	Après 8 minutes	Après 15 minutes	Après 17 minutes	Après 18 minutes	Produit final	Spiegel employé
Graphite. . .	3.165	0.426	0.254	0.030	0.009	0.019	0.825
C combiné. .	0.386	2.784	8.996	0.178	0.024	0.352	3.541
C total. . . .	3.551	3.210	1.250	0.208	0.033	0.371	4.366
Silicium. . .	2.391	1.090	0.107	0.057	0.040	0.060	0.067
Manganèse .	0.493	0.150	0.133	0.130	0.101	1.170	16.143
Phosphore. .	0.089	»	0.092	0.076	»	0.090	»

(b) Scorie

ÉLÉMENTS	Après 8 minutes	Après 15 minutes	Après 17 minutes	Après 18 minutes	Après addition de spiegel
Silice.	62.646	73.237	75.636	61.296	64.154
$Al^2O^3 + PhO^5$. .	7.985	4.514	5.194	4.242	5.711
FeO.	1.928	»	»	13.476	13.949
MnO	15.781	11.831	10.921	10.825	12.810
CaO.	0.656	1 110	0.950	0.747	0.742
MgO	0.481	0.641	0.379	0 288	0.239
Fer métallique.	10.521	8.718	9.125	9.125	2.394

En étudiant avec quelque attention les tableaux précédents, on reconnaît qu'ils confirment de tous points la théorie générale de l'affinage de la fonte. Si et Mn s'oxydent d'abord, le fer ne brûle, d'une façon

ıente, qu'après la période de l'ébullition quand C a presque dis-

ɔxyde peu à l'origine, aussi longtemps que le bain est encore
n Si ; mais il disparaît rapidement à la suite de Si, pendant la

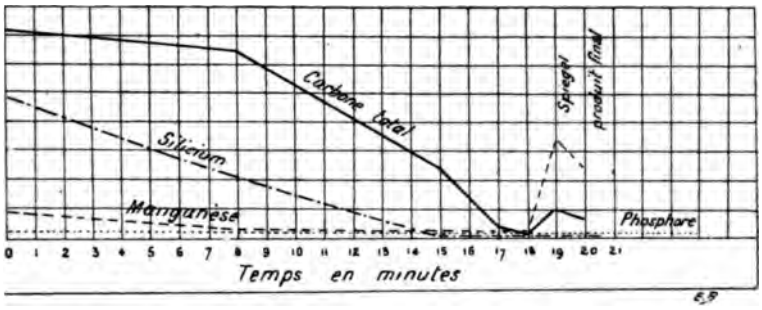
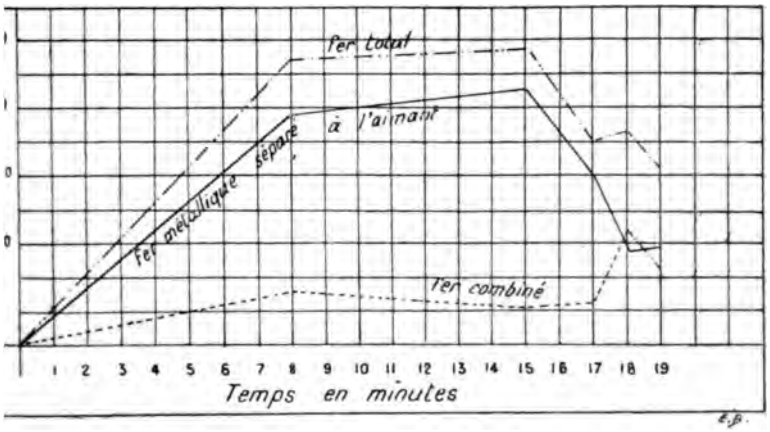


Fig. 117.

le de l'ébullition. Une certaine quantité de soufre est éliminée dès
ımencement ; ce qui reste persiste jusqu'à la fin.
ɔour cent en phosphore augmente, car ce métalloïde ne pouvant
iner reste tout entier dans le produit final qui a subi un certain



g. 118. — Variation du fer dans la scorie Bessemer acide, d'après M. King.

t, à cause du départ d'un certain nombre des corps étrangers de la
d'entrée.
double rôle de la fonte employée pour l'addition finale ressort

clairement ; cette fonte spéciale majore la quantité de C et de Mn dans le produit résultant et diminue le fer dans la scorie.

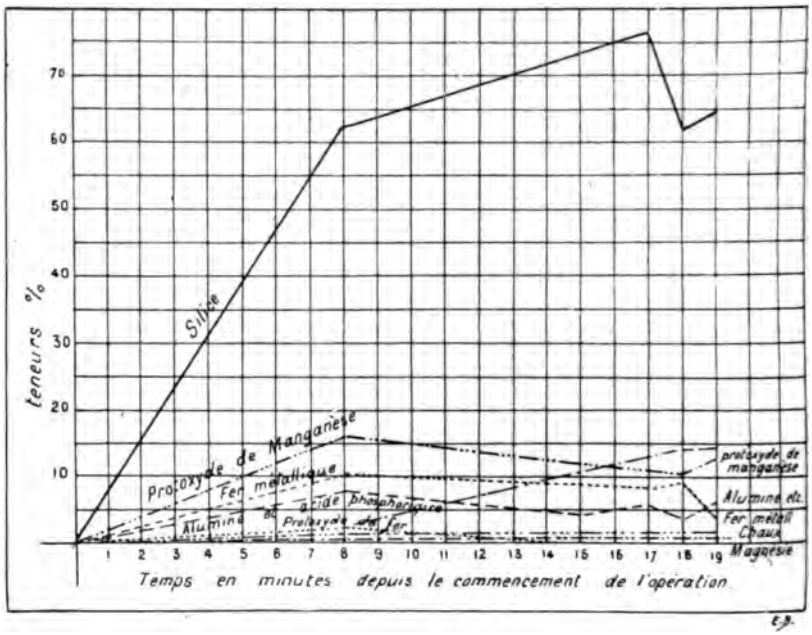


Fig. 119. — Variations dans la composition de la scorie Bessemer acide, d'après M. King.

B. — Analyse des produits gazeux

L'analyse des produits gazeux permet de se rendre compte de la répartition de l'oxygène du vent soufflé dans les divers produits de l'oxydation formés en cours d'affinage. L'oxygène de l'air est bien plus retenu par le silicium, le manganèse et le fer, que par le carbone.

ANALYSE DES PRODUITS GAZEUX

Analyse de M. Snelus. *Durée :* 18 minutes

LÉMENTS EN VOLUME	1re PÉRIODE		2e PÉRIODE			
	2 minutes	4 minutes	6 minutes	10 minutes	12 minutes	14 minutes
. . . . .	10.71	8.57	8.05	3.58	2.38	1.34
. . . . .	»	3.95	4.58	16.59	29.44	31.11
. . . . .	0.92	»	»	»	»	»
. . . . .	»	0.88	2.00	2.00	2.16	2.00
. . . . .	88.37	86.58	85,37	74.83	66.02	65.55
	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
SERVATIONS CTROSCOPE A L'ŒIL NU	Spectre faible continu Étincelles sans flamme	La ligne de Na apparaît. Étincelles nombreuses	Lignes de Na, K, Li. Étincelles décroissent	Spectre complet Flamme épaisse, brillante	id.	id.
C brûlé à l'état de CO^2	100.00	68.48	65.46	15.46	7.28	4.13
C — — CO	»	31.52	35.54	84.54	92.72	95.87
Si oxydé	72.31	69.80	69.01	39.58	4.24	3.34
C — . . .	27.09	30.20	30.99	60.42	95.76	96.66

Analyse de M. Tamm à Westanfors.

ÉLÉMENTS en volume	De 1 mm 30 à 2 mm 30	De 5 minutes à 8 minutes	De 8 min. 45 à 9 min. 45	De 11 min. 30 à 12 min. 30
CO^2	11.68	6.80	0.16	3.31
CO.	»	19.76	26.03	22.86
O	0.65	0.22	»	»
H	»	0.08	0.06	0.13
Az.	87.67	73.14	73.75	73.70
»	100.00	100.00	100.00	100.00

II. — *Bilan calorifique*

Comparons la *chaleur produite* par la combustion des éléments de la fonte à la *chaleur absorbée* dans l'opération.

Admettons que le déchet par oxydation soit de 10 0/0, ce qui est le cas ordinaire des bonnes fontes au coke prises directement au haut-fourneau.

Supposons de plus que ce déchet, par kilogramme de fonte affinée, provienne de la combustion des éléments suivants :

$$C = 0^k04$$
$$Si = 0^k02$$
$$Mn + Fe = 0^k04$$
$$\text{Total} = 0^k10$$

A. — *Calcul de la chaleur engendrée.* — Admettons, pour fixer les idées, qu'un tiers du carbone soit transformé en CO^2 et deux tiers en CO ; on sait en effet, que la proportion de CO^2 va en diminuant en cours d'affinage, sauf cependant tout à fait à la fin.

$\frac{1}{3}$ de 0^k04 ou 0^k013 de C	transf. en CO^2	dégagera	8080 (1)	$\times 0,013 =$	105 cal. 04
$\frac{2}{3}$ de 0^k04 ou 0^k017 de C	— en CO	—	2473	$\times 0,027 =$	66 cal. 77
0^k02 de Ci	— en SiO^3	—	7830	$\times 0,02 =$	156 cal. 60
0^k04 de Fe+Mn	— en FeO et MnO		1350 (2)	$\times 0,04 =$	54 cal. 00
		Total des calories engendrées. . .			382 cal. 41

B. — *Calcul de la chaleur absorbée.* — On ne peut calculer d'une façon approximative que celle qu'emportent les gaz de la combustion.

A cet effet, évaluons d'abord les quantités d'O absorbées par les éléments dont il vient d'être parlé :

0^k013 de C	transformé en CO^2	absorbe	$\frac{8}{3} \times 0,013$	$= 0^k035$
0^k027 de C	— en CO	—	$\frac{4}{3} \times 0,027$	$= 0^k036$
0^k02 de Si	— en SiO^3	—	$\frac{3}{7} \times 0,02$	$= 0^k023$
0^k04 de Fe+Mn	— en FeO+MnO		$\frac{2}{7} \times 0,04$	$= 0^k011$
		D'où oxygène total		$= 0^k105$

(1) En admettant que le pouvoir calorifique de C = 8080.
(2) — — de Fe et de Mn soit le même.

Cet oxygène total correspond à un poids d'azote de $3.33 \times 0,105 =$)k350.

Les gaz sortant du convertisseur se composent donc de :

Az		0k350
CO^2 . . .	$\frac{11}{3} \times 0,013$	0k048
CO . . .	$\frac{7}{3} \times 0,017$	0k063

ans parler de H dont le poids est négligeable, puisqu'en volume il n'y n a que 0,02.

D'après cela, par chaque degré centigrade, la chaleur emportée sera e :

Pour Az.	0,0854	calories
— CO^2	0,0104	—
— CO.	0,0154	—
Total par degré	0,1112	calories.

Or, on arrivera à un maximum fort exagéré en admettant que les az puissent prendre une température égale à celle du bain métallique u'ils traversent.

A l'origine, la température du bain est de 1250 à 1300 degrés ; à la in, d'après les expériences calorimétriques de *Gruner* elle est de 1500 ı 1600°.

Par suite, si l'on prend 1400° comme température moyenne des gaz, on trouvera une limite supérieure à la réalité.

Or, cette limite est de $0,1112 \times 1400 = 156$ calories.

La chaleur engendrée par la combustion intermoléculaire dans l'appareil est de 382 cal. 5 et les gaz en emportent au maximum 156. Il en reste 226,5 pour les pertes par rayonnement direct et pour celles qui ont lieu au travers des parois du convertisseur.

On conçoit donc que l'air froid, en traversant la fonte, l'échauffe au lieu de la refroidir, et qu'après affinage, c'est-à-dire après combustion des substances à éliminer, le produit soit à une température telle qu'on puisse le laisser reposer 15 à 20 minutes sans qu'il se fige avant la coulée.

Cette haute température se produit dès que la fonte renferme au delà de 2 0/0 de silicium.

Ces 2 0/0 de Si apportent au bain presque autant de chaleur que

4 0 0 de C. Aussi est-il difficile de traiter des fontes peu siliceuses: on a alors des projections et même des explosions au début de l'opération à cause de l'état pâteux du bain.

Il faut toutefois, pour que la chaleur soit récupérée par le bain, que la masse de fonte traitée ne soit pas trop faible par rapport à la surface des parois du convertisseur.

On a cherché par des artifices détournés (injection de poussières de charbon avec le vent, injection de vent chaud, etc...) à tirer parti de fontes peu siliciées, mais on a dû y renoncer et revenir au traitement des fontes siliceuses.

Nous retiendrons donc que le silicium est dans le Bessemer acide le combustible intermoléculaire le plus important, et qu'il y a lieu de n'y traiter, par conséquent, que des fontes riches en Si.

CHAPITRE II

BESSEMER BASIQUE OU PROCÉDÉ THOMAS ET GILCHRIST

Article 1. — Notions générales sur la déphosphoration

Dans le second volume de son Traité de Métallurgie paru en Février 1878, *Gruner* confirme, au sujet de la théorie de la déphosphoration, les idées générales émises sur ce point dans le premier volume paru en 1875. Après avoir annoncé que c'est l'acidité de la scorie qui s'oppose à la déphosphoration, l'auteur ajoute que l'affinage des fontes phosphoreuses ne pourra se faire « *au convertisseur Bessemer ou dans les fours Siemens aussi longtemps que le revêtement intérieur de ces appareils sera formé d'éléments argileux ou siliceux.* » Et plus loin : « *Il y a là, et dans l'emploi des réactifs solides, encore un vaste champ de recherches ouvert aux maîtres de forges.* » — On ne saurait mieux dire pour résumer les deux grands principes dont l'application régit toute la déphosphoration actuelle : *Revêtement basique* et *laitiers basiques* ; du moins quand on veut exclusivement la réaliser sur la sole d'un four à

rbère. Au Bessemer, comme on va le voir, il faut quand on veut ıosphorer qu'une troisième condition soit satisfaite.

l. — *Essais de déphosphoration au convertisseur Bessemer* (1).

essemer, comprenant toute l'importance du traitement des fontes sphoreuses dans son appareil, propose d'ajouter dans la cornue di- réactifs spéciaux pour déphosphorer ; ces réactifs sont onéreux.
a *chaux* cependant est signalée, mais elle n'est pas adoptée.
n 1869, apparaissent les brevets de *E. Muller* et de *Caron*.
. Muller préconise un revêtement en briques magnésiennes et indi- l'addition de briquettes de chaux destinées à saturer les acides de corie.
aron propose l'emploi de la magnésie pure de l'île d'Eubée comme ètement du convertisseur ; M. *Tessié du Motay* l'essaye aux usines Terrenoire en 1874.
lette substance à cause de son prix élevé doit être abandonnée ; mais constate, en outre, que la déphosphoration est à peine appréciable. ıgénieur de l'usine affirme, à la suite de ces essais, qu'il est impos- e de déphosphorer au Bessemer quelles que soient la nature du revê- ıent et la basicité du laitier ; car, dit-il, les phosphates formés sont luits par l'oxyde de carbone produit lors de la décarburation. *vthian Bell* partage cet avis.
ı la même époque, soit en 1874, M. *Pourcel*, à Terrenoire, avec le ne revêtement basique, cherche la solution dans l'emploi de réactifs teux tels le spath fluor, le sel marin, le borax, etc...
e laitier ne renferme qu'une quantité de silice bien inférieure à la te indiquée par Gruner comme compatible avec l'élimination de ide phosphorique, et cependant les résultats sont tout à fait insuf- nts. Le minimum de SiO^3 fixé par Gruner est de 25 à 30 0 0.
ous verrons plus loin quelle est l'opération métallurgique suppléı taire à faire intervenir pour que la déphosphoration réussisse dans pareil Bessemer.

Consulter sur le « *procédé Thomas* » le mémoire si documenté de M. Bresson paru la *Revue universelle des mines et de la métallurgie*. Il a été pour nous un guide eux dans une des questions les plus complexes de la sidérurgie moderne.

II. — *La déphosphoration est réalisée au convertisseur Bessemer.*

Les comptes-rendus des meetings de l'*Iron and Steel Institute* de 1878 contiennent une communication de M. Snelus concernant la déphosphoration au Bessemer aux usines de West Cumberland à Workington. Dès 1872, les essais par la chaux d'addition dans un convertisseur à revêtement basique sont entrepris avec un certain succès, paraît-il ; mais M. Snelus ne peut publier que six ans plus tard les résultats de ses recherches.

Le mémoire de M. Snelus est un document technique du plus haut intérêt ; c'est la déphosphoration actuelle au convertisseur au *sursoufflage près* qui est le soufflage supplémentaire qu'il est indispensable de donner après la combustion du carbone. C'est pourtant cette dernière opération métallurgique qui doit rendre le procédé véritablement industriel.

Deux hardis inventeurs, MM. *Thomas* et *Gilchrist* (1) présentent, en 1878, un mémoire relatant le tableau très complet de leurs essais et la solution complète de la question (*Septembre et Octobre*).

Ces essais, commencés en 1875 dans un convertisseur ne chargeant que 2^k7, ne constituent d'abord qu'une expérience de laboratoire ; puis ils se continuent dans un convertisseur de 200^k remplacé bientôt par un appareil de 600^k mis à la disposition des inventeurs par la compagnie de Bleanavon.

Enfin M. *Menelaüs*, directeur de l'usine de Dowlais, met à la disposition des inventeurs un convertisseur de 6 tonnes.

Dégageons tout d'abord, avant de donner la théorie complète, deux principes fondamentaux de fabrication.

a) — Il y a nécessité de continuer à donner le vent pendant un certain temps après la combustion du carbone ; en agissant ainsi, au lieu de réaliser comme au Bessemer acide la période des fumées, c'est-à-dire la combustion intégrale du fer, on fait disparaître le phosphore.

Cette opération s'appelle le sursoufflage ou *after-blow*.

b) — Si la garniture, au lieu d'être basique est siliceuse, quelle que

(1) Les noms des deux inventeurs que l'usage a abrégés sont en réalité les suivants : *Sydney Gilchrist Thomas*, métallurgiste amateur, mort à Paris le 1er février 1885 et *Percy Gilchrist*, chimiste aux Aciéries de *Blaenavon*, cousin du premier.

›it l'intensité du sursoufflage, on n'arrive pas à déphosphorer : garissage basique et sursoufflage, telles sont les bases du procédé.

L'addition de chaux ou, plus généralement, les additions basiques ıites dans la cornue ne sont pas indispensables, elles n'interviennent ıe pour que l'acide phosphorique ne donne pas des phosphates baques au détriment de la matière même de la paroi.

Article 2. — Théorie de la déphosphoration au convertisseur.

Le revêtement intérieur de la cornue doit être *basique ;* nous discurons ultérieurement quelle doit en être la nature.

Disons néanmoins tout d'abord que la chaux y figure en proportion otable. Il faut réaliser une période supplémentaire de soufflage conécutive à celle des flammes pendant laquelle se brûle le carbone : cette ériode appelée *sursoufflage* ou *after-blow* est caractéristique des opéations basiques au convertisseur Bessemer.

Il y a nécessité de procéder à des additions calcaires pour que le evêtement soit ménagé.

Tels sont les faits acquis par les expériences de *Thomas* et *Gilchrist;* assons à la théorie.

I. — *Les combustibles intermoléculaires*

Nous savons que ce sont des combustions intermoléculaires qui déterminent l'affinage dans le procédé Bessemer acide.

A ce point de vue, le procédé Thomas n'est autre que le procédé Bessemer dans lequel on a modifié la nature des combustibles. On ne rouve dans le Bessemer acide que trois combustibles principaux : *le silicium — le manganèse — le carbone.* Il ne saurait être question du phosphore ; on sait, en effet, que si l'on traite des fontes phosphoreuses on retrouve le phosphore intégralement dans le bain d'acier ; il y a donc nécessité de ne traiter que des fontes aussi exemptes que possible de ce métalloïde.

Au convertisseur basique on se propose précisément d'affiner les fontes phosphoreuses ; un quatrième combustible intervient forcément, c'est le *phosphore.*

Or, on était tellement habitué à ne considérer que le silicium comme

combustible principalement efficace au Bessemer acide qu'on ne craignait pas d'utiliser des fontes phosphoreuses ayant encore une certaine quantité de silicium, quantité insuffisante pour nuire en fin d'affinage mais suffisante toutefois pour donner au début, par sa combustion, une certaine chaleur au bain.

L'influence calorifique du phosphore, ou pour mieux dire, son rôle comme combustible intermoléculaire était par suite méconnu, puisqu'on croyait indispensable à cet égard la présence du silicium dans les fontes traitées. Et cependant, quoique ayant un pouvoir calorifique moindre que le silicium *(5000 calories au lieu de 7000)*, le phosphore n'en est pas moins un combustible précieux.

Le silicium brûle au début de l'affinage ; la silice formée s'unit comme on le verra, soit à la chaux d'addition, soit de préférence à la paroi basique du revêtement. Le phosphore au contraire brûle à la fin, le laitier que forme l'acide phosphorique, s'unissant à la chaux, remonte à la surface répartissant toute la chaleur dégagée dans un bain déjà fluide.

Les conditions de combustion du phosphore sont donc plus avantageuses tant au point de vue de la répartition de la chaleur que de celui du temps plus court pendant lequel elle s'effectue.

Quoi qu'il en soit, les premières fontes affinées au convertisseur basique contenaient jusqu'à 1,50 0/0 de silicium.

C'est à l'usine de *Hoërde* en Allemagne, sous la direction de M. *Massenez*, que revient le mérite d'avoir la première établi sur une base vraiment rationnelle le procédé Thomas, en utilisant le phosphore des fontes comme combustible dans l'opération et sans craindre d'en voir une trop grande proportion se substituer presque entièrement au silicium.

Le phosphore, suivant l'expression devenue classique, n'était plus traité « *en ennemi* » mais en « *allié* ».

En résumé, les proportions de silicium et de phosphore des fontes à affiner au procédé basique sont renversées si on les compare à celles qu'il fallait réaliser dans les fontes à affiner au procédé acide.

Si les fontes sont peu riches en silicium, elles seront blanches et, comme elles n'auront pas été obtenues en allure chaude, elles contiendront forcément du soufre.

Le soufre interviendra donc comme un cinquième combustible principal au Bessemer basique ; on verra qu'il se brûle dans la cornue en

rtie en même temps que le phosphore, l'autre partie brûlant après. Comme combustible il est fort gênant, sa combustion entraînant un ınd déchet, car avec lui se brûle toujours une grande quantité de fer, noins qu'on ne force à la fin la proportion des additions manganéères, auquel cas une grande partie du soufre peut passer à la scorie 'état de sulfure de manganèse.

Il résulte des considérations ci-dessus que si l'on ne peut consentir .voir du silicium dans la fonte à traiter, on aura du soufre en prortion plus ou moins grande il est vrai, selon la teneur du lit de fusion ce métalloïde, indépendamment de celle des cendres du coke.

Dans le cas où la fonte aura du silicium, il faudra augmenter la prortion des additions calcaires au commencement de la charge ; dans second cas, la présence du soufre obligera à augmenter les additions ınganésifères à la fin de l'opération.

II. — *Succession des combustions intermoléculaires et formation des laitiers, ou affinage proprement dit.*

La chaux préalablement chauffée à haute température ayant été introite dans le convertisseur, on charge dans cet appareil la fonte prise cubilot si l'on marche en deuxième fusion, ou au haut-fourneau si l'on ırche en première fusion.

On relève le convertisseur en donnant le vent et l'affinage commence.

Nous considérerons 4 périodes correspondant à la combustion des talloïdes : silicium, carbone, phosphore, soufre, nous réservant d'inquer parallèlement dans quelles conditions s'effectue la combustion s deux métaux : manganèse et fer.

Il est clair que cette subdivision si catégorique est surtout utile au int de vue didactique ; en réalité, il n'y a pas de limite aussi netteent déterminée dans les diverses combustions intermoléculaires.

Avant que le silicium ne soit tout à fait brûlé, le manganèse comence à brûler, les autres éléments restant intacts, etc...

A. — *Combustion du silicium.* (Période des étincelles). — Cette emière période est analogue à la période des étincelles du Besseer acide ; elle est relativement paisible à cause de la formation oxydes de fer restant dans la cornue et donnant la chaleur au bain étallique.

Le silicium brûle le premier et passe à l'état de silice, il ne sort que des étincelles blanches du bec de la cornue.

La silice formée se combine partiellement d'abord, selon toute apparence, à la base dont est constitué le revêtement ; et cela, malgré la présence de la chaux d'addition. Cette chaux, quoique fortement chauffée, ne se trouve pas, en effet, à une température aussi élevée que la paroi même du convertisseur qu'on sait être portée à haute température avant la mise en train de toute opération d'affinage. Si l'on traite une fonte très siliceuse, la corrosion des parois est très rapide par la formation abondante de silicate de chaux.

Or, pendant que s'effectue la combustion du silicium le manganèse (1) brûle en partie, le fer lui-même commence à brûler quoique en moins forte proportion : il y a par suite formation d'oxydes métalliques. Une autre partie de la silice se combinera donc à ces oxydes métalliques donnant des silicates de fer et de manganèse. Il pourra arriver, si la fonte à affiner est peu siliceuse, qu'il n'y ait qu'une formation à peine sensible de silicate de chaux par corrosion de la paroi, les silicates de fer et de Mn dominant d'abord, à cause de la grande proportion d'oxydes métalliques par rapport à celle de la silice.

Le bain récupère cependant une quantité de chaleur de plus en plus forte dans ces combustions successives ; il arrive un moment où la chaux d'addition est assez chaude pour réagir à son tour en s'unissant exclusivement à la silice, transformant ainsi les silicates métalliques formés en silicates de chaux venant majorer la quantité plus ou moins grande antérieurement engendrée par corrosion du garnissage.

L'oxydation du silicium est à peu près complète : avec une teneur initiale inférieure à 1 0 0, ce corps disparaît en moins de 2 ou 3 minutes, avec une teneur de 1 1 4 en 5 ou 6 minutes, avec une teneur de 1.7 0 0 en 9 minutes.

Les nombreuses analyses d'acier déphosphoré à la cornue n'en révèlent que des traces ; l'absence de ce métalloïde, quand elle coïncide avec une faible teneur en carbone, est un des facteurs importants de la grande douceur du métal Thomas.

Les scories ou laitiers à la fin de cette période d'affinage ont généralement une couleur rouge ponceau.

(1) Au convertisseur basique, le manganèse est utile. Par son oxydation préalable il retarde celle du fer. Il favorise, le cas échéant, le départ du soufre lors de *l'after-blow*.

— *Combustion du carbone.* (Période des flammes). — Il semble loxal, à priori, d'avoir placé l'étude de la combustion du phos- : après celle du carbone ; le phosphore étant plus oxydable que le ıne.

fait, le phosphore s'oxyde avant le carbone dès que la masse a ı peu échauffée et passe à l'état d'acide phosphorique qui se com- a avec la chaux. Que deviendra ce phosphate de chaux formé ? ıx cas extrêmes peuvent se présenter : ou bien la fonte qu'on contient 1 0/0 ou plus de silicium ou elle en a moins.

— *Fonte riche en silicium, c'est-à-dire à plus de 1 0/0.* — Dans

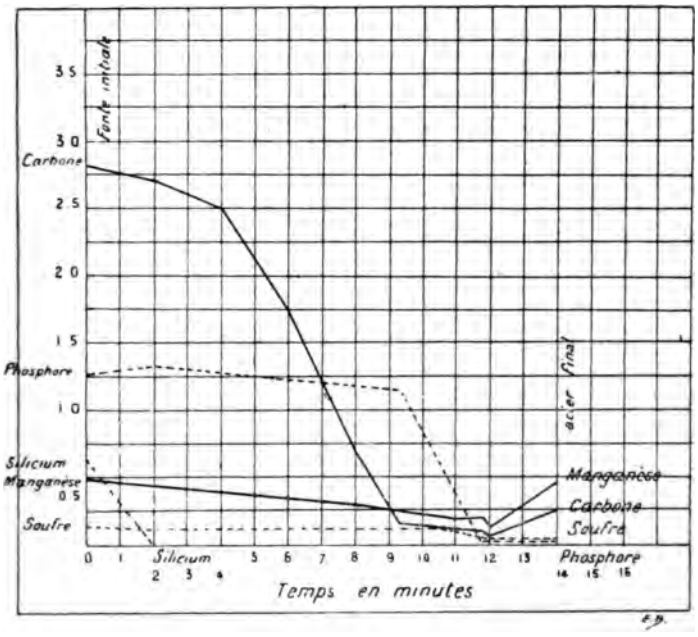


Fig. 120. — Opération de Hoerde (Juin 1880), d'après Massenez.

s, les silicates de chaux constituant le laitier sont tout d'abord ment acides, ils possèdent au moins 25 à 30 0/0 de silice. Or, il cquis que la stabilité d'un phosphate n'est assurée dans l'affinage ıtant que le laitier contient moins de 25 à 30 0/0 de silice (Gru-

r suite, le laitier étant acide dès le début, la formation du phos- : de chaux ne pouvant se maintenir, le phosphore ne pourra s'éli- r. Ce phosphate de chaux ne deviendra stable que vers la fin de

la combustion du silicium ; le laitier aura pu devenir basique, la chaux ayant acquis une température assez élevée pour saturer intégralement la silice formée.

La combustion du carbone commencera alors ; l'oxyde de carbone formé réduira presque entièrement la faible quantité du phosphate de chaux qui a eu à peine le temps de se constituer.

Le phosphore réapparaîtra à peu près complètement dans le métal.

β) — Fonte pauvre en silicium, c'est-à-dire à moins de 1 0/0. — Dans ce cas, les silicates de chaux constituant le laitier deviennent

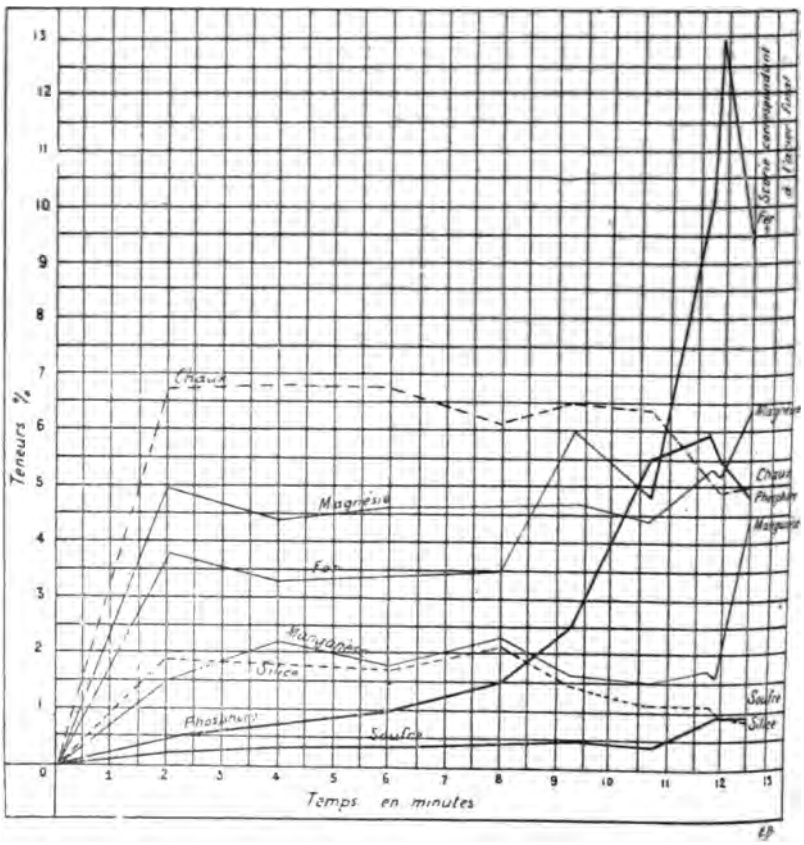


Fig. 121. — Variations dans la composition de la scorie.

très rapidement basiques, l'acide phosphorique formé n'est pas déplacé par la silice de sa combinaison avec la chaux. Le phosphore peut donc s'éliminer en grande partie en passant à la scorie. Pendant la décar-

ration qui commencera avant que tout le phosphore soit brûlé, une rtaine quantité de phosphate de chaux sera réduit par CO ; l'expé-ence fait voir qu'à la fin de a combustion du carbone, 18 à 20 0/0 acide phosphorique ont échappé à la réduction.

La quantité de phosphore à brûler pour terminer l'affinage sera donc en moins grande dans ce cas que dans le cas précédent. Cela posé, venons à la combustion du carbone :

Comme au Bessemer acide, le carbone s'élimine en produits gazeux rmés d'un mélange de CO et de CO^2. La flamme blanche apparaît au l de la cornue ; un brassage énergique s'effectue au travers de la asse devenue plus fluide.

Quelquefois même on voit, projetées au-dessus de la cornue, des par-lles métalliques ou scoriacées. Comme le silicium, le carbone brûle à u près complètement ; au bout de 12 à 15 minutes de soufflage la neur en carbone peut s'abaisser de 1 millième à 8 dix-millièmes selon nuance de la fonte traitée, c'est-à-dire selon qu'elle contient de 3 0/0 2,5 0/0 de carbone environ.

On aperçoit au spectroscope 4 raies vert pâle correspondant au car-one. On admet que cette période est terminée quand 3 raies sur 4 ont isparu.

C. — *Combustion du phosphore* — (Sursoufflage ou *after-blow*). — ès que le carbone est entièrement brûlé, le phosphore commence disparaître à son tour.

La flamme très courte s'échauffe de plus en plus et devient d'un blanc ntense.

Mais ici une remarque s'impose : n'y a-t-il pas lieu de s'étonner que on ne se soit pas débarrassé avant la décarburation des scories phos-hatées formées antérieurement en cours d'opération ? Comme l'oxyde e carbone les réduit pendant la décarburation, il semble qu'on veuille ien retarder à plaisir le départ du phosphore.

La réponse est aisée : il faut remarquer en effet qu'avant la décarbu-ation, période de l'opération où le décrassage paraît nécessaire, la tem-érature du convertisseur est relativement peu élevée puisqu'il y a peu de licium dans la fonte et qu'une partie seulement du phosphore est brûlée.

Le bain n'a pas la fluidité voulue pour que la scorie se sépare nette-ent du métal en fusion en surnageant à sa surface ; on ne saurait onc songer à l'extraire entièrement de la cornue.

L'oxydation du phosphore est très rapide et pour une fonte à 0,50 0/0 de silicium et 2,50 0/0 de phosphore (*ce qui constitue un minimum moyen en silicium et un maximum moyen en phosphore*), la teneur en phosphore passe à un millième dans une période comprise entre 3 et 4 minutes.

On conçoit du reste que l'énergie des réactions s'accroisse en raison même de l'élévation plus grande de la température au sein d'une masse de plus en plus fluide. Grâce à la combustion du phosphore le métal gagnera la fluidité que dans le Bessemer acide lui procurait la combustion du silicium.

Le manganèse, qui n'a cessé de brûler depuis le début de l'opération, achève sa combustion et est d'un secours très précieux pour protéger le fer dans les derniers instants du sursoufflage contre une oxydation trop rapide.

Quand on ne craint pas trop l'augmentation du prix de revient, on part de fontes assez manganésées pour bénéficier du rôle bienfaisant de ce métal dans l'affinage. Il est du reste facile de s'en rendre compte en prenant des éprouvettes d'essai pendant le cours du sursoufflage. Avec une fonte manganésée l'éprouvette se forgera bien et, à la cassure, décèlera le grain de l'acier; si la fonte n'a pas de manganèse, l'éprouvette (*tout en indiquant l'état plus ou moins avancé de la déphosphoration de par les paillettes brillantes de phosphure de fer*) se forgera mal et montrera un métal tout oxydé.

Des analyses nombreuses ont montré, en outre, que pendant la déphosphoration, le manganèse retourne au bain métallique et élimine une certaine quantité du soufre qu'il contient.

La proportion de manganèse recherchée oscille généralement entre 1 et 2 0/0 au grand maximum.

Il résulte des considérations présentées plus haut à propos de la combustion du silicium que la durée du sursoufflage sera en raison directe de la teneur de la fonte en ce métalloïde. A quel état le phosphore passe-t-il donc dans la scorie? Est-ce à l'état de phosphate de chaux ou à l'état de phosphate de fer?

La question longtemps débattue paraît aujourd'hui résolue. M. *G. Hilgenstock*, de Hœrde, s'occupant de recherches sur la composition des scories du convertisseur basique remarqua, en Avril 1883, une formation cristallisée remarquable dans quelques blocs de scories. Au lieu de trouver à l'analyse la composition d'un phosphate connu, cet ingénieur

ıt une combinaison d'acide phosphorique et de chaux dans
: la proportion de chaux dépassait de près d'un tiers celle du
ate tribasique. Une analyse plus rigoureuse permit de recon-
ın phosphate répondant à la formule $4CaO.PhO^5$, soit un phos-
étrabasique de chaux.

ı, la grande quantité de chaux qu'exige le procédé Thomas.

Mars 1884 les docteurs *von Groddeck*, conseiller des mines, et
ckmann de Clausthal confirment l'existence du phosphate tétra-
:.

uin 1886, confirmation nouvelle de ce fait était apportée à l'*As-*
m des sidérurgistes allemands à Dusseldorf par M. Hilgenstock;
nait, en outre, que tous les phosphates de chaux du laitier Tho-
pondaient à la formule du phosphate tétrabasique et que le lai-
-même n'était qu'un mélange fondu de phosphate de chaux, de
de chaux et d'oxydes métalliques.

ɔur mener rapidement à bonne fin la déphosphoration d'une
e contenant 3 0/0 de Ph et de minimes quantités de silicium, il
environ 18 0/0 de chaux. Une réaction qui doit être aussi com-
: et aussi rapide que la déphosphoration du fer dans le procédé
mas, exige toujours un excès de réactif. La formation du phos-
te tricalcique nécessiterait, dans le cas de la fonte brute susdite,
ıeu plus de 8 0/0 de chaux; soit 9 0/0 en tenant compte de la silice.
n réalité, on ajoute le double de réactif pour assurer une bonne
che des opérations. C'est là un excès qui peut ne pas paraître
lé lorsque l'on estime la grande activité que l'agitation produite
le vent soufflé imprime à la réaction, l'expérience a cependant
ıvé que cette forte addition de chaux est absolument indispen-
e dans les conditions ordinaires, pour obtenir une fin rapide de
léphosphoration. » (*Hilgenstock*)

'ait conduit à considérer comme très probable la formation d'un
hate tétrabasique : il nous est impossible du reste d'entrer dans
ıil d'autres preuves indirectes apportées également par M. *Hil-*
ck en faveur de son existence.

qui néanmoins a lieu d'étonner, c'est le principe même de la for-
ı d'un pareil corps.

phosphate tribasique seul était connu comme tel, conformément
ıéorie que dans l'acide phosphorique 3 atomes d'hydrogène sont
acés par 3 atomes d'un autre métal mono-atomique.

Ce côté théorique de la question n'est pas élucidé.

Il importe de remarquer que ce phosphate tétrabasique de chaux est le *résultat final* de l'élimination du phosphore.

En réalité le phosphore passerait d'abord dans l'affinage à l'état de phosphate tri ou tétrabasique de fer, l'acide phosphorique formé s'unissant d'abord au fer ; ce phosphate ferreux serait ensuite transformé en phosphate de chaux sous l'action de la chaux, base plus forte. La formation de ce phosphate ferreux s'explique par ce qu'on appelle *l'action de masse ;* les réactions étant en effet d'autant plus faciles quand un des réactifs est dans un certain excès par rapport à l'autre ou dans un état de dilution convenable. Or, c'est ce qui arrive pour l'oxyde de fer.

Quant à la durée du sursoufflage, elle dépend de la teneur de la fonte en phosphore et de sa teneur en silicium, ainsi qu'il résulte des considérations que nous avons déjà exposées plus haut, au début de cette étude, sur la combustion du phosphore. En général, elle ne dépasse pas 3 à 4 minutes.

Pendant cette période de sursoufflage, le spectroscope n'indique plus rien, parce que la flamme rentre dans le col de la cornue. Pour régler la fabrication, on prend de temps en temps des éprouvettes de métal et l'on continue, s'il y a lieu, le sursoufflage ou on l'arrête après examen de ces éprouvettes. Le phosphore est caractérisé dans les cassures par des paillettes blanches de métal, cristallines, ayant une longueur qui peut atteindre 2 ou 3 millimètres. En d'autres termes, la cassure au lieu d'être à grains arrondis a un aspect feuilleté à grains plus ou moins allongés et brillants. Le contremaître peut apprécier la teneur à un millième près, au-dessous de sept dix-millièmes la cassure n'offre plus rien de particulier pouvant déceler la présence du phosphore.

L'aspect de la cassure, d'après la grosseur du grain et la compacité générale du métal, indique aussi le degré de décarburation et permet de déterminer la quantité de spiegel ou de ferro-manganèse nécessaire pour la recarburation, suivant la dureté demandée.

D. — *Combustion du soufre* (ou *over-after-blow).* — Le soufre, on l'a dit, est très nuisible dans l'acier, un millième au maximum suffit à le rendre impropre au laminage.

L'acier crique au travail à chaud, en général.

L'expérience a prouvé qu'on pouvait se débarrasser d'une certaine proportion du soufre dans le convertisseur basique, surtout quand ce métal-

le est primitivement en quantité notable et en présence d'une cer-
ıe quantité de manganèse, 1 à 1/2 0/0 par exemple. Nous avons vu
: le sursoufflage serait, dans une certaine mesure, favorable à la
ulfuration puisque le manganèse rentrerait alors de nouveau dans
ɔain.

.e soufre disparaît après le phosphore si on continue l'action du
t; cette période de continuation du soufflage *(over-after-blow)* n'est
endant pas sans inconvénient, car on brûle en même temps beaucoup
ɔ de fer. Au *Creusot*, où le procédé basique est employé, le soufre
cendrait de 0,20 0/0 dans la fonte, à 0,3 0/0 dans l'acier.

.es additions finales de manganèse, sous quelque forme qu'elles
:nt, paraissent dans bien des cas faire baisser la teneur en soufre.

)'après certains expérimentateurs le soufre disparu ne se retrouve
intégralement dans la scorie, ce qui prouve qu'une partie s'est
appée de la cornue par volatilisation.

)n ne sait pas exactement sous quelle forme disparaît ce corps, la
iode de sa combustion étant encore peu étudiée.

)n préfère traiter, en effet, des fontes peu sulfureuses ou soumises
à à l'un des procédés de désulfuration connus, vu l'oxydation trop
nde du fer pendant l'*over-after-blow*. Cette oxydation est difficile-
ıt corrigée en entier par les additions finales, le métal étant presque
jours bulleux et assez médiocre.

)uand on procède à l'*over-after-blow*, on s'arrange à rendre cette
iode aussi courte que possible pour ne pas trop brûler de fer.

.'opération proprement dite d'affinage est terminée; il faut procéder,
ès avoir décrassé le bain, aux additions finales de spiegel ou de
o-manganèse pour amener le métal au degré de désoxydation et de
ırburation convenables avant de procéder à la coulée.

Ious avons vu au Bessemer acide quelles précautions on peut être
:né à prendre dans cette opération.

Article 3. — Pratique de l'opération

I. — *La cornue.*

.. — *Caractéristiques de la cornue basique.* — Les dimensions de
ornue basique sont bien plus fortes que celles de la cornue employée

dans le procédé acide. Son poids total, garnissage compris, peut atteindre 100 tonnes ; on y affine de 12 à 15 tonnes d'acier.

Les cornues grand modèle présentent une hauteur totale de 5 à 6 mètres avec un diamètre maximum au ventre de 2m50.

Aux dimensions près, la forme générale de la cornue est la même que dans le Bessemer acide, sauf toutefois pour le bec qui, dans certains modèles, a subi une heureuse modification. On a rendu le col amovible comme l'est la boîte à vent de toutes les cornues (acides ou basiques). Dans le procédé acide on n'avait pas songé à introduire ce perfectionnement, car les projections sont peu considérables ; du reste, par quelques coups de pic on pouvait aisément détruire les engorgements produits.

Au Bessemer basique les scories sont fort abondantes à cause des additions calcaires, il a donc fallu prévoir le remplacement de pièces qui, obstruées et débouchées plus souvent, sont plus sujettes à se détériorer. De plus, et pour rendre l'obstruction moins facile, le col a été maintenu dans certaines cornues dans le prolongement de l'axe de la partie cylindrique au lieu d'être incliné sur elle comme il arrive dans toutes les cornues acides : l'adhérence des scories projetées est ainsi diminuée.

B. — *Quelques mots d'historique sur le garnissage.* — En 1875, *Gruner* examine dans le premier volume de son Traité de Métallurgie la question de l'emploi de la *chaux* et de la *magnésie* comme matière réfractaires. Cet éminent professeur préconise l'emploi de la *dolomie* (1) cuite à haute température, un revêtement de cette espèce permettra seul d'après lui de déphosphorer la fonte soumise à l'affinage. Dans le second volume du même Traité paru en 1878, la question de l'emploi de revêtements basiques pour déphosphorer la fonte dans la cornue Bessemer ou au four Siemens est encore développée.

Au meeting de l'*Iron and steel* tenu à Londres en Mars 1878, M. S.-G. *Thomas* annonce qu'il a éliminé le phosphore au convertisseur Bessemer. Les esprits sont si peu préparés, à cette découverte métallurgique si considérable en résultats pratiques que l'incrédulité est générale. A la même séance pourtant, M. *Snelus* se décide à déclarer que six ans auparavant quelques essais de déphosphoration prati-

(1) On sait que la **dolomie** est un carbonate de chaux, d'alumine et de magnésie

ıés par lui, sur une petite échelle toutefois, ont été couronnés de ccès.

Les discussions qui suivent prouvent que la méthode adoptée par cet ıbile expérimentateur est tout à fait rationnelle.

Au meeting de l'*Iron and Steel* tenu à Paris en Septembre 1878, ncrédulité est à peine vaincue. Seuls les essais publics du 4 avril 79 aux Aciéries *Bolchow* et *Vaughan* par S.-G. *Thomas* et P. *Gilrist* commencent à convaincre les industriels.

On ne saurait, malgré la hardiesse des essais de *Snelus* et la réus-e de ceux de *Thomas* et *Gilchist*, diminuer en rien le mérite de *Gru-r* qui, simple professeur, à une époque où les procédés mysté-ux étaient encore plus en honneur qu'aujourd'hui dans les usines, *ait pu indiquer par avance, d'une façon aussi précise*, la voie dans quelle les industriels devaient marcher pour réaliser la déphosphora-ın. Non content d'avoir posé les bases des principales théories métallur-ques dans de remarquables travaux, *Gruner* apportait à l'industrie, r sa connaissance approfondie des réactions si complexes de la chi-ie industrielle, le moyen d'augmenter sa richesse, en indiquant la mar-e à suivre pour exploiter de puissantes masses de minerai jusque-là ns valeur.

C. — *Variétés de garnissage.* — Bien des matières furent essayées r *Thomas* et *Gilchrist* pour le garnissage de leur cornue.

Le *calcaire*, le *silicate de soude*, l'*argile réfractaire*, etc., sont suc-ssivement employés sous forme de briques ou damés en pisé; ces ma-res ne résistent pas à l'usage.

La *magnésie*, dont l'emploi a été suggéré par *Caron* et d'autres, est à fois trop coûteuse et, employée seule, trop tendre.

L'emploi des revêtements en *oxyde de fer* est impraticable à ces npératures. La présence de l'oxyde de fer amène des perturbations ılentes dans l'opération causées par la réduction des oxydes supérieurs fer, soit par le carbone, soit par le fer métallique du bain. Ces per-bations se traduisent par des projections de métal et par un refroi-ısement notable de l'acier. Une telle garniture serait trop fondante; on toute apparence, elle disparaîtrait complètement avant la fin d'une ıle coulée.

La *dolomie* impure est enfin signalée par les inventeurs comme don-nt les meilleurs résultats. Ce carbonate de chaux, d'alumine et de

magnésie se fritte convenablement et résiste assez bien, après calcination, aux agents atmosphériques. La dolomie ne doit pas être trop pure, sans quoi elle cuit mal. En broyant et gâchant avec de l'eau cette matière et en la moulant en briques cuites à très haute température, on a un produit assez imparfait, mais susceptible d'emploi. Le principal inconvénient de ces briques est que par la cuisson elles perdent 33 0/0 de leur volume et 45 0/0 de leur poids. Dans ces conditions, il est difficile d'obtenir des briques cuites, bien dures et non déformées. C'est à M. *Riley*, chimiste anglais, que paraît due l'idée de substituer les huiles minérales à l'eau pour le gâchage des matériaux réfractaires. M. l'ingénieur *Walrand*, en 1880, employa cette méthode au *Creusot* en utilisant un pisé de dolomie cuite au four *Siemens* et agglomérée avec du goudron.

Cet usage est aujourd'hui généralisé.

Le revêtement intérieur est en pisé damé ou en briques superposées; la fabrication est la même dans les deux cas à cela près que, dans le premier procédé, la pâte basique est refoulée contre la paroi au lieu d'être moulée en briques.

La dolomie qui paraît le mieux convenir contient :

Silice	7	0/0
Peroxyde de fer et d'alumine .	3,5	0/0
Chaux	30	0/0
Magnésie	17	0/0
Acide carbonique	42	0/0.

On trouve la dolomie sur les bords de la Meuse, dans l'Est de la France, en Alsace et dans le Grand-Duché. Les Alpes autrichiennes sont formées en grande partie de masses dolomitiques.

Nous donnerons comme exemple la fabrication du pisé :

La dolomie est tout d'abord calcinée dans des fours analogues aux fours à chaux ; elle n'aurait pas, à l'état naturel, assez de résistance pour constituer un revêtement et, d'autre part, l'acide carbonique qui se dégagerait d'elle au contact du métal liquide refroidirait le bain de fonte et désagrégerait le revêtement.

Après la calcination, la dolomie présente une surface noire et brillante, indice d'une bonne cuisson. Après un triage soigneux, on la concasse dans des fours spéciaux. La poussière de dolomie est alors

élangée au goudron rendu liquide par un courant de vapeur, et sou-
ise ensuite à l'action d'un malaxeur.

Le revêtement latéral de la cornue s'obtient en foulant le mélange
olomitique, au moyen de dames portées au rouge, autour d'un moule
bois représentant la capacité intérieure de l'appareil. Après le démon-
ge du moule, la cornue est desséchée par un feu de coke.

La préparation des fonds se fait d'une façon analogue.

II. — Détails de l'operation industrielle.

La fonte à affiner peut venir du haut-fourneau ou du cubilot comme
n l'a dit au Bessemer acide (1).

La composition de la fonte à traiter au convertisseur basique (appelée
ouvent *fonte Thomas*) a été étudiée plus haut à propos de la combus-
on intermoléculaire qui s'effectue dans la cornue.

Les teneurs des divers corps entrant dans sa composition varient dans
s limites suivantes :

Silicium de 0,30 à 0,40 0/0 ; *manganèse* de 1,50 à 2,50 0/0 ; *phos-
hore* de 2 à 2,25 0/0 ; *soufre* de 0,03 à 0,05 0/0.

Nous donnerons plus loin un aperçu sommaire sur la nature et le
aitement des minerais fournissant ces fontes phosphoreuses.

A. — *Additions calcaires.* — Les additions calcaires se font sous
rme de chaux pure portée au préalable à une température élevée,
ouvent même on retire directement la chaux du four de cuisson du
lcaire pour la verser dans la cornue afin d'éviter des frais de réchauf-
ge et l'emploi de chaux ayant absorbé l'humidité et l'acide carbonique
e l'air (Walrand).

Au début de la fabrication on chargeait du calcaire brut ; cette masse
roide refroidissait le bain et par sa décomposition retirait à ce bain
ne certaine quantité de chaleur, l'acide carbonique produit causait
ouvent des projections dangereuses.

(1) Quand on veut avoir des fontes bien régulières, au cas où l'on a plusieurs hauts-
ourneaux ou cubilots, on se sert de *mélangeurs*. Ce sont de vastes récipients recevant
a fonte liquide par les poches de fonderie venant des appareils de première ou de
euxième fusion ; ils sont garnis intérieurement de matériaux réfractaires et sont suscep-
ibles, en général, d'osciller autour d'un axe horizontal. L'emploi des mélangeurs est sur-
out utile dans l'opération Bessemer acide afin de régulariser la teneur des fontes en
ilicium, avant de les soumettre à l'affinage.

On charge généralement toute la chaux en une fois avant d'introduire la fonte dans la cornue ; le poids chargé varie de 15 à 22 0/0 du poids de la fonte, en raison même de la composition variable de celle-ci.

B. — *Point d'arrêt.* — Le point d'arrêt est difficile à déterminer par le spectroscope, dans le procédé basique.

Dès que le carbone est brûlé, d'abondantes fumées de manganèse s'échappent de la cornue ; aussi faut-il prendre des éprouvettes d'essai de plus en plus rapprochées. Tandis que dans le procédé acide, l'éprouvette permet de voir si le métal est *décarburé ;* dans le procédé basique, elle permettra d'indiquer à quel degré il est *déphosphore.*

Tant qu'il reste du phosphore dans le métal on a un grain feuilleté, micacé, à teinte claire et à aspect lumineux ; de plus l'éprouvette casse au premier coup de pilon.

Si le grain est bien formé et s'il y a des traces de nerf avec teinte mate, le phosphore a disparu ; l'éprouvette peut alors se plier à bloc sans rupture.

La déphosphoration ayant été jugée suffisante, on donne néanmoins le vent pendant près d'une minute pour liquéfier la scorie qui s'est figée près du bec pendant la prise d'essai et qui pourrait faciliter les engorgements. Cette scorie très calcaire a, en effet, un point de fusion très élevé.

La prise d'essai se fait, comme au Bessemer acide, en coulant un petit lingot de 5 à 6 cm. de diamètre qu'on transforme en galette aplatie au pilon, dès son démoulage, et qu'on trempe encore chaude à l'eau froide.

On la ploie ensuite au marteau et on examine l'angle de ployage maximum avant rupture et le grain du métal.

C. — *Decrassage et additions finales.* — Le soufflage étant terminé, il faut incliner la cornue et faire écouler les scories surnageant le bain. Sans cette précaution, quand on procédera à l'addition finale, l'oxyde de carbone résultant de la réaction de la fonte recarburante (spiegel ou ferro-manganèse) réagira sur les phosphates de la scorie et incorporera du phosphore dans le métal.

Mais il y a une autre raison qui a bien sa valeur au point de vue pratique.

La quantité de scorie formée au convertisseur basique est bien plus

grande que celle qui est formée au convertisseur acide ; tandis qu'au Bessemer acide la scorie surnage dans la poche de fonderie, préservant le métal contre l'action de l'air, on ne saurait songer à la récupérer au Bessemer basique à cause du volume énorme des poches de fonderie qu'elle nécessiterait.

L'addition finale se fait comme il a été déjà expliqué au Bessemer acide.

Les aciers durs sont particulièrement difficiles à obtenir dans le procédé basique, le métal est en effet complètement désilicié ; en outre, et quel que soit le soin que l'on ait pris de faire écouler la scorie il en reste toujours un peu (*il est même nécessaire qu'il en soit ainsi pour préserver le bain métallique d'un trop grand rayonnement*) ; or le carbone de la fonte recarburante est perdu en partie car il y a toujours une légère action rephosphorante.

Quand on veut obtenir une certaine dureté, il y a un peu plus de chances de l'obtenir en versant le métal dans la poche de coulée où l'on aura, au préalable, placé la fonte d'addition.

Dans ce cas, la rephosphoration est très faible.

Tandis qu'il était difficile d'obtenir des aciers très doux au Bessemer acide à cause de l'introduction forcée du silicium dans le métal, on peut dire que le Bessemer basique, où l'on réalise l'élimination complète du silicium et du carbone (*puisque sans crainte d'oxyder le fer on peut arriver à brûler tout le carbone à cause du sursoufflage*), permet d'obtenir les aciers extra-doux en recarburant uniquement par des ferromanganèses riches.

Puisque le métal Thomas ne contient presque pas de silicium, on y trouvera de nombreuses cloches ou ampoules remplies de gaz qu'on a appelées soufflures. C'est un fait acquis en métallurgie que la présence du silicium rend les aciers compacts. Le mode même d'élaboration du métal favorise cet état bulleux ; aussi, pour permettre au dégagement gazeux de s'accomplir entièrement avant la coulée, voire même avant l'addition finale, a-t-on eu l'idée dans certaines aciéries de verser à ce moment le contenu de la cornue sur la sole chauffée d'un four *Siemens* où, sans rien perdre de sa chaleur, le métal peut rester une ou deux heures. Ce procédé, assez coûteux, en somme, est loin de s'être généralisé.

Article 4. — Minerais phosphoreux et laitiers basiques

Nous croyons utile de donner quelques indications générales sur les principaux gisements de minerais phosphoreux et sur l'utilisation des produits dans la cornue Thomas.

I. — *Les minerais phosphoreux.*

On distingue en Europe quatre régions principales d'exploitation des minerais phosphoreux dans lesquelles sont établies actuellement les aciéries Thomas.

A. — *Moselle et Luxembourg.* — Parmi toutes les formations du continent il faut d'abord signaler celle fort importante qui, naissant près de *Longuyon*, s'étend de l'Ouest à l'Est en suivant la frontière belge et luxembourgeoise jusqu'aux environs de *Dudelange*, puis formant un angle presque droit se dirige du Nord au Sud par *Thionville* et *Metz* jusqu'à *Nancy*.

Dans la partie française, on compte trois importants groupes d'exploitations réunies autour de *Longwy*, *Briey* et *Nancy*.

La formation complète comprend 6 couches ayant une épaisseur variant de 0^m50 à 5 mètres, séparées généralement par des bancs regardés comme stériles, comprenant plus ou moins de fer, de calcaire ou de marne et dont les épaisseurs varient de 0 à 4 mètres.

La teneur en fer du minerai varie de 26 à 46 0/0 ; ce métal y est à l'état de sesquioxyde.

Sa gangue compacte ou friable selon les couches comprend : SiO^3, Al^2O^3 et CaO, l'acide phosphorique y figure dans les teneurs de 1 à 1,8 0/0.

Un seul élément manque à ces minerais, c'est Mn ; on y supplée, dans leur traitement, par l'addition au lit de fusion d'une certaine quantité de minerais d'importation assez riches en Mn.

B. — *Gisement d'Ilsede.* — Les aciéries Thomas allemandes font un large emploi des fontes obtenues avec les minerais de la formation précitée ; mais elles possèdent, au cœur de l'*Allemagne* même, un gise-

nt moins étendu, mais supérieur en qualité situé à *Ilsede*, soit à peu :s à égale distance des villes de *Brunswick* et de *Hanovre* et, par te, très à portée des grandes usines du bassin houiller de la Ruhr. Les minerais de ce gisement n'ont pas plus de fer que les précédents, is ils contiennent du manganèse et n'exigent pas dans leur traitent l'addition de minerais étrangers.

Enfin, il faut encore signaler les gisements de moindre importance se rencontrent en *Bavière* et dans l'Est de l'empire allemand.

C. — *Gisements autrichiens.* — Ce pays possède de superbes gisent des minerais, à peu près exempts de phosphore, qui se rencontrent tout dans les montagnes des Alpes Styriennes et Carinthiennes et ıs les Karpathes, c'est-à-dire dans des contrées à peu près complèıent dépourvues de combustible minéral.

l existe au contraire, en *Bohème*, à l'ouest de *Prague*, une couche ulière reconnue sur plus de 15 kilomètres, dont la puissance varie 6 à 20 mètres et qui avec une direction à peu près Est-Ouest plonge s le Sud avec une inclinaison variant de 35 à 60 degrés.

Le minerai consiste en grains de structure oolithique dans une pâte ılement ferrugineuse et assez riche en fer (45 à 50 0/0) ; sa teneur acide phosphorique varie de 1,35 à 2,5 0/0. Comme il ne contient ı de Mn, on y remédie aisément en ajoutant dans le haut-fourneau e certaine proportion de minerais spathiques de *Styrie* qui sont pour plupart manganésifères.

D. — *Gisements anglais.* — Bien que les minerais carbonatés des ıillères qui se rencontrent en *Angleterre* en quantités considérables prêtent également à la déphosphoration, c'est surtout la puissante mation basique du *Cleveland* qui est devenue le centre de la fabrıion de la fonte Thomas. Ce gisement se compose de plusieurs bancs més par un carbonate de protoxyde de fer présentant un lustre terıx et une couleur gris verdâtre. La teneur en fer est plutôt faible, cide phosphorique y est en teneur suffisante pour pouvoir donner à fonte une proportion d'au moins 1,5 0/0 de phosphore ; quant à Mn en trouve des traces, ce qui constitue une supériorité sur les mines de la Moselle qui n'en contiennent pas.

II. — *Les laitiers basiques.*

Nous savons qu'il se forme dans la cornue des laitiers basiques riches en chaux et en acide phosphorique ; leur composition varie dans les limites suivantes :

Acide phosphorique	16 à 18 0/0
CaO.	35 à 38 0/0
MgO	7 à 8 0/0
SiO^3.	6 à 3 0/0
FeO.	11 à 20 0/0
MnO	4 à 8 0/0
Al^2O^3.	4 à 20 0/0

Si l'on compare la teneur en acide phosphorique de ces laitiers avec celle des phosphates naturels employés en agriculture, on reconnaît qu'ils peuvent comme ceux-ci favoriser la végétation par le phosphore, la chaux et la magnésie qu'ils contiennent.

De là, un débouché de sous-produits fort important à signaler pour les aciéries Thomas.

Etant donné l'état peu assimilable sous lequel le phosphore se trouve dans ces laitiers, on avait cru d'abord qu'il serait nécessaire de leur faire subir un traitement chimique pour les amener à leur maximum d'utilisation. On a reconnu depuis qu'il suffisait de les broyer assez finement pour que le phosphore qu'ils contiennent fût assimilable, sinon dans l'année même de leur emploi, au moins l'année suivante. Il est spécialement recommandé de répandre les laitiers sur les champs un certain temps avant le labour qui devra les enfouir, afin d'empêcher le fer et le manganèse, qui y sont à l'état d'oxydes, au minimum d'oxydation, de passer à l'état d'oxydes supérieurs au détriment de l'oxygène des racines.

Le passage à l'état d'oxydes supérieurs se fera uniquement par l'intermédiaire de l'air.

Il semble qu'il suffise d'en répandre 2000 à 2500^k par hectare aussi bien pour les blés que pour d'autres cultures spéciales.

CHAPITRE III

LES PETITS CONVERTISSEURS

ii l'emploi des cornues Bessemer de 8 à 15 tonnes présente pour les ndes usines des avantages incontestables, il est non moins utile aux ies de moyenne importance d'établir à côté de la fabrication du fer le l'acier puddlés celle des fers et aciers fondus obtenus en petites sses à l'aide de convertisseurs d'un bien moindre tonnage.

On peut objecter, il est vrai, que les autres procédés d'élaboration aciers, et notamment le procédé Martin-Siemens que nous étudie- s bientôt, peuvent se prêter aisément à de pareilles exigences, car on t construire des fours de dimensions très réduites. Or, nous verrons , dans ces procédés, l'affinage ne peut s'y effectuer en se servant ex- sivement de fonte, on doit nécessairement compléter le bain par des itions de métal plus doux ou de matières oxydantes. C'est là évi- ment une complication dans l'approvisionnement des matières pre- res pour de petites usines. L'idée est donc venue de traiter la fonte le dans des convertisseurs de petites dimensions, analogues à la nue Bessemer. L'épaisseur du bain métallique à brasser par l'air ufflé étant moins considérable que dans les grandes cornues, on peut ner à cet air une moindre pression et réaliser de ce fait une éco- nie sur les frais d'installation des machines soufflantes. Dans cer- ns types de convertisseurs on a été plus loin encore dans cet ordre lées, en introduisant latéralement le vent par un seul côté, pres- au niveau de la surface du bain.

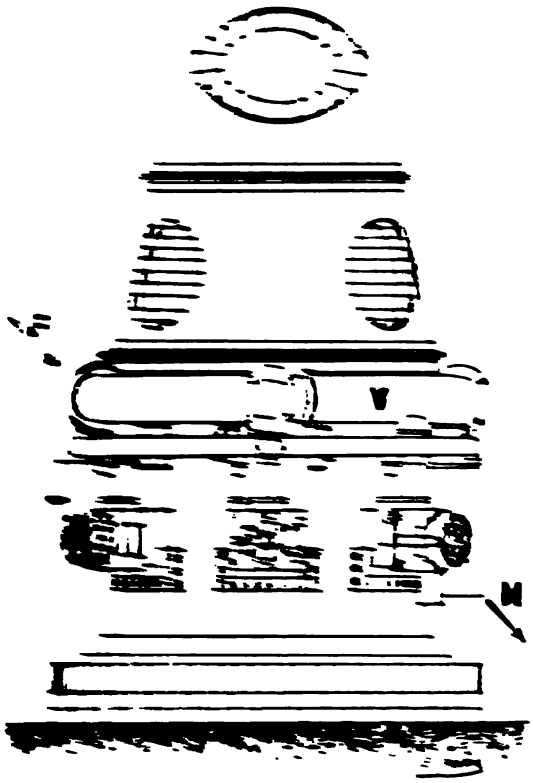
Les petits appareils permettent de fabriquer des pièces de moyen nage pour le matériel agricole et celui des chemins de fer, soit par e de moulage, soit par voie de coulée en lingots.

Quant aux grands convertisseurs Bessemer, sur 9 millions et demi tonnes d'acier produit en 1895, près de la moitié a été employée à fabrication des rails, le reste a servi à faire des profilés de toutes tes, pièces de forge, etc.....

I. — *Appareil Clapp et Griffiths*

L'appareil *Clapp* et *Griffiths* consiste essentiellement en un conver-

[illegible] muni d'u[illegible]
[illegible] tuyères pou[illegible]



[illegible]

[illegible] — V, conduite

[illegible] l'élaboration du

[illegible] intérieur de
[illegible] des tuyères.
[illegible] n'arrête jamais
[illegible] dans la cornue
[illegible] métal liquide
[illegible] obturateur
[illegible] des tuyères.
[illegible] à ouvrir,

ce de chacune des tuyères, afin de pouvoir nettoyer aisément -ci.

moyen d'un seul cubilot, on arrive à fabriquer par journée de : heures 10 à 15 tonnes :r.

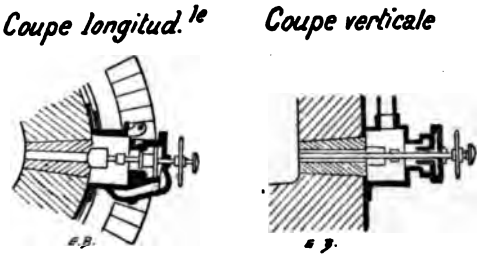


Fig. 123 et 124. — Tuyère.

: cornues *Clapp* et :*ths* sont employées en :*ique* et en *Angleterre* ›araissent fonctionner d'assez bonnes condi-

cornue américaine *Hat-* :st presque identique à la cornue *Clapp* et *Griffiths*, mais le de coulée des laitiers y a été supprimé.

France, la cornue *Clapp* et *Griffiths* n'a pas eu de succès, elle y fort avantageusement remplacée par le convertisseur *Robert*.

II. — *Convertisseur Robert.*

Gustave *Robert*, étant directeur des aciéries de *Stenay* (Meuse), ina, en 1885, un convertisseur de faible tonnage à soufflage latéral. vent est introduit par des tuyères horizontales voisines de la ce supérieure du bain de fonte et placées obliquement par rapport 'ace intérieure sur laquelle elles débouchent. On donne ainsi au un mouvement giratoire.

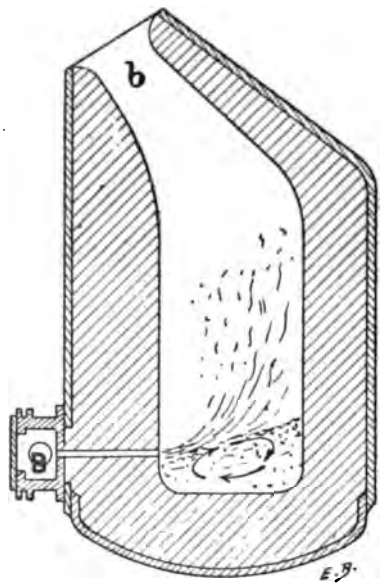
cornue n'est pas fixe comme la précédente qui reposait sur un if en maçonnerie; elle est mobile comme la cornue Bessemer autour axe horizontal constitué par les deux tourillons. On la penche, au t de l'opération, de manière à faire émerger presque complètement ıyères hors du bain ; on abaisse ensuite le niveau des tuyères par ·otation convenable de la cornue au fur et à mesure que l'opération ève.

ı procédant ainsi, on se propose d'amener les molécules métalliques ›ir successivement et à diverses reprises l'action affinante de l'air. scorie se forme rapidement et surnage au dessus du métal ; l'ac- oxydante s'étendant de molécule à molécule jusque dans les parties lus profondes du bain.

›pération dure environ un quart d'heure.

L'idée du soufflage latéral est déjà ancienne ; le premier convertisseur Bessemer utilisé avec succès était soufflé latéralement (*Appareil de Saint-Pancras*) et les tuyères y étaient placées obliquement par rapport aux grands côtés de l'appareil.

On espère ainsi supprimer le brassage trop violent du bain ainsi que le mélange du métal et de la scorie et obtenir un métal plus homogène et plus de exempt soufflures.



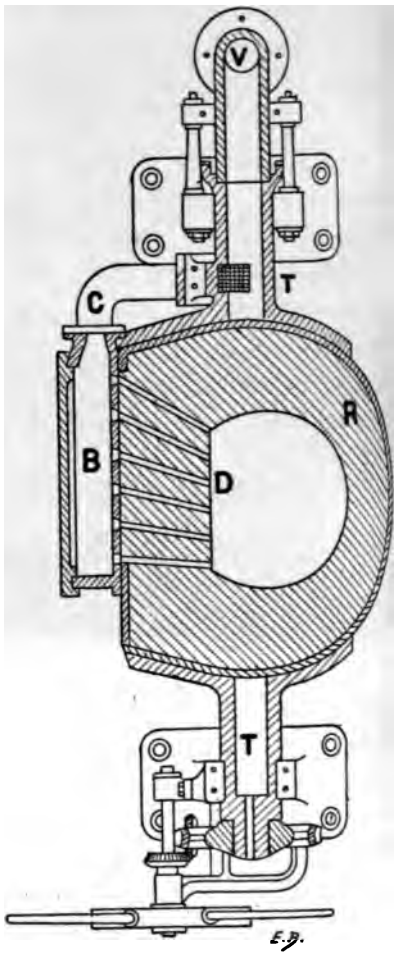


Fig. 125 et 126. — Le convertisseur Robert.

b, bec. — *B*, boîte à vent. — *C*, conduite du vent soufflé. — *D*, tuyères. — *R*, revêtement. — *TT*, tourillons. — *V*, arrivée de l'air venant de la soufflerie.

Nous ne pensons pas qu'il y ait tant d'avantages à attendre de ce dispositif au point de vue de l'action affinante ; le résultat le plus net est qu'au lieu d'avoir recours aux fortes pressions de l'opération Bessemer proprement dite, on peut se contenter de 25 à 35 centimètres de mercure.

Les cornues Robert employées sont généralement d'assez faible ton-

ge ; on a cependant essayé d'appliquer ce dispositif à des cornues de q à six tonnes. Il semble, dès lors, qu'il n'y ait pas grand avantage employer le système Robert de préférence à la cornue Bessemer. ut-être, pourrait-on objecter avec raison que l'action affinante est p lente ou insuffisante à cause de l'emploi même du soufflage laté- l.

Le convertisseur *Tropenas*, également à soufflage latéral, offre beau- up de ressemblance avec la cornue *Robert*. Il présente toutefois la rticularité d'avoir *deux* rangées de tuyères divergentes.

Les descriptions que nous venons de donner suffisent pour se faire ne idée de ce genre d'appareils ; il serait oiseux de suivre dans le étail les particularités plus ou moins ingénieuses des inventeurs. ous terminerons toutefois ce chapitre en indiquant une variante e travail adoptée depuis peu avec un des types de ces petits conver- isseurs.

III. — *Procéde Walrand-Légénisel* (1).

La cornue Walrand-Légénisel est une cornue Bessemer de dimen- ions réduites : il n'y a, par suite, rien de particulier à dire sur l'ap- areil. Ce qui caractérise la méthode de travail, c'est que pour parer au efroidissement du bain on pratique une *addition* de *ferro-silicium* en erminant par un sursoufflage pour éliminer sûrement tout le silicium n excès. De cette façon, malgré le faible volume de l'appareil, le métal btenu à la coulée est très chaud et exempt de soufflures.

Le métal étant très chaud et ne contenant plus, à peu de chose près, ue du fer et du carbone, on pourra aisément pratiquer telle ou telle ddition qu'on voudra et obtenir les diverses variétés d'aciers spéciaux recherchés aujourd'hui dans l'industrie.

La contenance des convertisseurs Walrand-Légénisel varie de 300 1000 tonnes et, quoique de faible tonnage, ces appareils peuvent pro- uire beaucoup, car, leur allure étant très chaude, leur refroidissement rès la coulée est très faible ; aussi peut-on y traiter deux ou trois

(1) Voir pour plus de détails :
1° Revue des progrès récents de la métallurgie du fer, par *M. de Billy* (*Bulletin de la ciété d'Encouragement*, janvier 1897).
2° *L'Ironmonger* du 5 septembre 1896.
3° La communication de M. Snelus au meeting d'automne 1896 de l'*Iron and Steel*.

charges par heure. L'addition de ferro-silicium a lieu, selon la composition des fontes, après 15 à 20 minutes de soufflage et atteint la proportion de 15 à 20 0/0 selon que la teneur en silicium du ferro-silicium est de 15 à 10 0/0. Le sursoufflage ne dure pas plus de 4 à 5 minutes.

D'après M. Snelus, il faut ajouter le ferro-silicium dès que les raies vertes commencent à disparaître.

TITRE IV

FABRICATION DES FERS ET ACIERS FONDUS

PAR LE PROCÉDÉ MARTIN-SIEMENS

PRÉLIMINAIRES

I. — *Principe du procédé.*

Ce procédé comprend plusieurs méthodes d'élaboration ou *variantes* *e travail* pratiquées à l'aide d'une même série d'appareils et basées ır l'application industrielle des principes posés par *Réaumur*.

Ces méthodes sont généralement comprises sous une dénomination nique, à savoir celle d' « Affinage par réaction ».

A. — *Méthode par dilution ou* **scrap process.** — Dans son remarquable traité de l'art de convertir le fer en acier publié en 1722, Réaumur dit : « que le fer doux est transformé en acier, lorsqu'on le ent immergé pendant quelque temps dans la fonte fondue. »

Il ajoute plus loin que l'on peut aussi préparer de l'acier « en fondant de la ferraille dans de la fonte » et qu'il a obtenu de l'acier de orge en mêlant à la fonte tantôt un quart, tantôt un tiers de fer.

Il est clair qu'en faisant dissoudre dans un bain donné de fonte des morceaux de fer ou d'acier (1), le carbone de la fonte se répartira, ainsi que ses autres matières étrangères du reste, dans une *masse ferreuse* *lus grande*, donnant telle ou telle nuance d'acier selon la dureté de la onte initiale, ou mieux, selon la douceur et la proportion des additions ffectuées.

Si dans 1000 kilog. de fonte à 3 0/0 de carbone *on peut faire dissoudre* 5000 kilog. de fer doux par exemple, on aura finalement 6000 kg. le métal à $\frac{5}{1000}$ de carbone, c'est-à-dire de l'acier.

(1) Ces morceaux de fer ou d'acier prennent généralement le nom de *riblons*.

En réalité, ce procédé d'élaboration n'est pas aussi simple qu'il le paraît ; on ne saurait pratiquement compter sur un métal à teneur en C aussi rigoureusement calculée. Les morceaux de fer ou d'acier, déchets de fabrication ou vieilles ferrailles, sont plus ou moins oxydés; en outre, il n'est pas possible d'effectuer un pareil mélange dans une atmosphère qui ne soit pas oxydante.

Ce n'est donc pas à la dilution du carbone dans une plus grande masse ferreuse que sera exclusivement due l'élaboration de l'acier, l'affinage par oxydation y aura aussi contribué, pour une bien faible part il est vrai, mais non négligeable.

B. — *Méthode d'oxydation par le minerai ou* **ore process.** — Au lieu de fer on peut se servir d'oxyde de fer, et ce procédé est déjà en germe dans le traité de *Réaumur* lorsqu'il dit que la fonte est adoucie par le « safran de mars ».

En 1798, *Clouet* dit positivement que l'on obtient du fer ou de l'acier fondu, en refondant la fonte avec de l'oxyde de fer : c'est du fer doux, en prenant 1/4 d'oxyde de fer, de l'acier en en prenant moins.

En opérant comme il vient d'être dit, on brûle les corps accompagnant d'ordinaire le fer dans la fonte, comme Si, Mn et notamment C, par l'oxygène de l'oxyde de fer ajouté au bain de fonte. En pratique, l'oxyde de fer est ajouté sous forme de *minerai*.

Ce procédé paraît tout d'abord moins onéreux que le précédent, puisqu'on substitue au fer ou aux riblons d'acier du minerai de fer forcément moins coûteux et qu'on hâte l'affinage par l'apport de son oxygène. Nous verrons plus loin quelle est la valeur respective des deux procédés.

On peut enfin placer après les deux méthodes précédentes celle qui consiste à ajouter au bain de fonte à adoucir des *loupes de puddlage* venant d'être cinglées. Ces loupes constituent un apport considérable d'oxygène par les scories interposées et un apport non moins précieux de fer métallique ; elles hâteront, d'une part, l'affinage de la fonte par oxydation et diluront, d'autre part, son carbone et autres matières étrangères dans une plus grande masse ferreuse.

Nous ne dirons que quelques mots de cette dernière méthode, car, après l'exposé complet des deux premières, son étude aura été faite *ipso facto*.

Remarquons qu'il faut supposer, pour l'application des principes précédents, qu'on a pu réaliser une température suffisante pour amener

at liquide les métaux ferreux destinés à réagir les uns sur les au-

fut là l'unique et considérable difficulté de la mise en pratique des ipes posés par Réaumur.

II. — *Historique du procédé.*

s premiers essais d'application des principes de *Réaumur* furent s dans des creusets, récipients en terre réfractaire fermés par un ercle, placés sur la sole d'une sorte de four à réverbère et chauffés ın foyer à grille.

mme la contenance des creusets était assez limitée et que, d'autre on se contentait de n'y produire que des aciers relativement durs 'aide de fontes choisies, on arrivait couramment à produire à l'état : certaines nuances d'acier.

ıoique, à l'origine, on cherchât à dessein à appliquer au creuset les ipes de *Réaumur*, nous ne saurions continuer à suivre les perfec- ements tentés dans cette voie car ils font partie intégrante d'un procédé d'élaboration d'acier dont l'examen terminera notre étude a production des métaux.

vrai dire, l'origine du procédé *Martin-Siemens* doit être recherchée les premiers essais tentés pour obtenir la fusion de l'acier par cation des principes de *Réaumur sur la sole d'un four à réver-*

ssenfratz décrit d'après *Vandenbrock*, inspecteur de l'Ecole des s de la Sarre, un four à réverbère ordinaire employé dès avant pour la préparation de l'acier fondu par voie de réaction. Le dé ne paraît pas cependant s'être alors répandu ni en Angleterre, leurs.

La difficulté de produire régulièrement la température voulue, dit *uner*, et surtout la qualité inférieure de l'acier produit résultant de nploi de fontes ordinaires ont dû amener l'abandon et même, qu'à un certain point, l'oubli de la méthode. »

faut ajouter aussi que l'atmosphère devait être plus ou moins oxy- dans ces fours, tandis qu'elle ne l'était pas dans les creusets; on par suite un métal chargé d'oxyde de fer. Or, s'il est vrai qu'on t ajouter de l'oxyde de manganèse dans les creusets depuis long-

temps, la pratique de l'addition du manganèse dans les grands appareils d'élaboration d'acier ne date que du procédé Bessemer.

Plus tard, en 1824, on voit *Bréant* (Annales des mines) revenir sur la même idée : « Je suis convaincu qu'avec des fontes très grises on pour-« rait fabriquer très en grand de l'acier fondu dans des fourneaux à « réverbère en ajoutant au métal en fusion une partie du même métal « oxydé ou mieux encore de l'oxyde de fer naturel. »

Après cela et pendant 20 ans, le four à réverbère semble oublié, il en est de nouveau fait mention en 1845 ; *Marshall-Heath* réclame en Angleterre, à cette époque, un brevet pour la fabrication de l'acier fondu par réaction dans un four à réverbère chauffé au gaz oxyde de carbone.

Les causes d'insuccès sont toujours les mêmes.

En 1854 un brevet est pris en Angleterre par *Stirling*, en 1855 un autre brevet est pris par *Bessemer* toujours au sujet de la fabrication de l'acier sur sole par application des principes de Réaumur.

M. *Sudre*, en 1860 et 1861, aux forges de *Montataire*, mais surtout le commandant *Alexandre*, en 1861, à l'usine de la Villeneuve près de Brest et en 1862, à la fonderie de *Ruelle*, font de nombreuses expériences pour réaliser au four à réverbère la fabrication de l'acier fondu.

Ils durent y renoncer à cause de l'impossibilité d'obtenir d'une façon régulière, dans un réverbère ordinaire, la température nécessaire et aussi, à cause de l'impossibilité de constituer des matériaux de construction suffisamment réfractaires.

Or, en 1856, *William Siemens* assisté de son frère *Fréderick* trouvait le moyen pratique d'obtenir des températures beaucoup plus élevées que celles qu'on obtenait jusqu'alors, tout en réalisant de grandes économies de combustible.

A cet effet, cet inventeur substituait au combustible solide le combustible gazeux, mais en réalisant la combustion rationnelle et méthodique de ce dernier.

Du combustible solide en couche épaisse est placé dans un foyer spécial où il ne doit brûler que partiellement se transformant surtout par distillation lente en gaz combustibles.

Dès leur sortie de ce générateur de gaz dit *gazogène*, les gaz combustibles s'échauffent à une source de chaleur préalablement créée et c'est chauds qu'ils arrivent dans le four où ils rencontrent, venant d'un conduit distinct, l'air qui doit les brûler ; cet air aura été chauffé préalablement.

La combustion s'effectuera dégageant une quantité de chaleur beaucoup plus grande que si le gaz combustible et l'air n'eussent point été chauffés auparavant, comme on l'a vu à l'étude théorique des combustions gazeuses. Les produits brûlés seront appelés à la cheminée, mais avant de s'y rendre on leur enlèvera la plus grande partie de leur chaleur. C'est de cette chaleur ainsi récupérée qu'on disposera pour chauffer, comme on l'a dit, l'air et le gaz combustible avant leur combustion, à l'aide d'appareils spéciaux décrits plus loin.

Mais ce n'est pas à un effet thermique supérieur résultant du chauffage préalable de l'air et des gaz avant leur combustion qu'il y a lieu d'attribuer exclusivement les avantages du chauffage *Siemens ;* d'autres facteurs interviennent comme on s'en convaincra dans la suite.

Il serait oiseux d'énumérer les divers essais de *Siemens ;* cette réalisation pratique d'une idée féconde n'ayant pas été immédiatement appliquée à la fabrication de l'acier d'après les principes de *Réaumur*.

C'est en *France* que fut résolue la fusion de l'acier sur sole.

M. Emile *Martin*, ancien officier d'artillerie, avait créé la fonderie de *Fourchambault*, près de *Nevers*, et l'avait dirigée avec succès pendant 30 ans. En 1853, il vint s'établir à *Sireuil* près d'*Angoulême*, dans l'intention de fabriquer des produits de choix tels que bandages, essieux, etc., à l'aide d'acier puddlé. Dans le but de perfectionner leur fabrication en étudiant sur place les procédés de chauffage perfectionnés, M. *Martin* et ses fils envoyèrent en *Angleterre* un ingénieur chargé d'étudier les fours *Siemens*.

En dehors de la fusion du verre, le réchauffage des paquets de fer était alors en 1862-1863 la seule application pratique du four créé par *Siemens ;* les essais de fusion de l'acier ayant à peu près échoué.

Un four à réchauffer *Siemens* fut donc installé à Sireuil à la suite de ce voyage : voyant la température élevée qu'ils réalisaient, MM. Martin cherchèrent, malgré les efforts que semble avoir faits à cette époque M. William Siemens pour les détourner de cette voie, à appliquer le nouveau four à leurs recherches de fusion.

Après de nombreux essais, MM. Martin purent appliquer, vers 1865, à un four à réverbère le dispositif de chauffage inventé par Siemens et fabriquer de l'acier fondu sur la sole à l'aide de fonte et de riblons de fer et d'acier. Un emploi judicieux de briques siliceuses de *Dinas* (Angleterre) éminemment réfractaires le rendit propre à résister aux températures qu'on y réalisa.

Vers 1867 et 1868, William Siemens réussissait de son côté la fusion de l'acier sur sole en employant surtout le minerai de fer et la fonte.

En 1869, les usines de Saint-Jacques, à Montluçon, puis celles de Firminy, adoptèrent le nouveau procédé.

Enfin, la Compagnie de Terrenoire et les usines du Creusot établirent des installations conçues sur une vaste échelle.

L'adhésion de ces deux grands établissements devait donner à l'emploi du nouveau procédé sa dernière sanction et lui assurer en France la confiance dont il a toujours joui depuis.

En même temps, le procédé Martin-Siemens se répandait à l'étranger.

CHAPITRE Ier

ETUDE PRATIQUE DU FOUR MARTIN-SIEMENS

Dans ce chapitre consacré exclusivement à des considérations d'ordre pratique nous étudierons successivement :

Le gazogène ou appareil producteur de gaz ;

Les chambres dites de récupération, destinées à constituer la source de chaleur devant réchauffer les gaz combustibles venant du gazogène et l'air qui doit les brûler ;

Le four à réverbère où doit s'effectuer l'élaboration de l'acier fondu.

Article 1er. — Le gazogène

Le gazogène est un foyer spécial où l'on prépare des combustibles gazeux par la combustion incomplète de combustibles solides.

On transforme de cette manière C en CO et on fait distiller les hydrocarbures ; les gaz combustibles ainsi obtenus sont brûlés méthodiquement dans les fours que l'on veut chauffer.

On distingue les gazogènes à *grilles* et les gazogènes à *vent soufflé* ; les premiers sont les plus employés.

I. — *Gazogènes à grille : Gazogène Siemens.*

A. — *Description du gazogène.* — Ce gazogène consiste en une sorte

de cuve parallélipipédique recouverte au ras du sol de l'usine par une voûte en maçonnerie résistante ; trois de ses parois sont verticales et construites en matériaux réfractaires.

Le devant appelé *poitrine* est fermé par une cloison oblique en fonte recouverte de briques on simplement par une maçonnerie réfractaire. Cette cloison se prolonge par une grille à larges gradins, comme dans

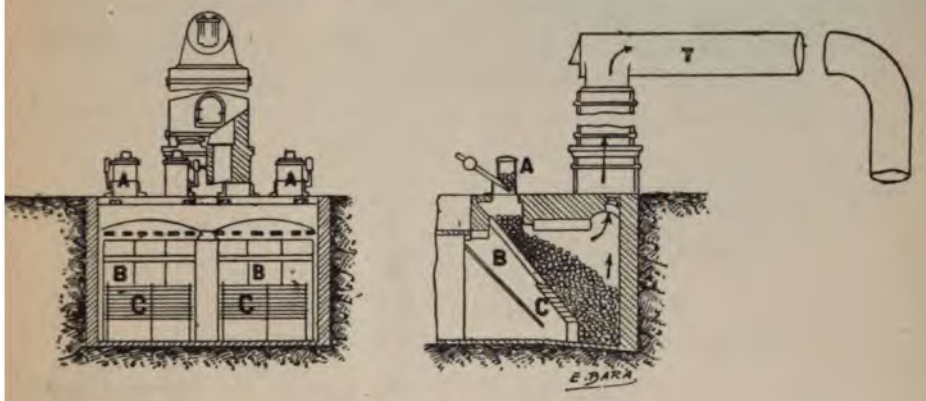


Fig. 127 et 128. — Gazogène Siemens.

A, boîtes de chargement de combustible. — *B*, plan incliné formé de plaques de fontes recouvertes de briques réfractaires. — *C*, Grille ouverte formée de barreaux plans horizontaux. — *T*, Tuyau de conduite des gaz.

le cas de la figure schématique ci-dessus, quand on charge dans le gazogène des combustibles pulvérulents ou non collants (anthracites, houilles sèches, lignites, etc.....)

Dans le cas où l'on charge des charbons en morceaux, la grille est à barreaux et peut faire avec la poitrine un angle assez accusé.

L'inclinaison de la poitrine et celle de la grille varient, du reste, avec la nature du charbon : celle de la poitrine varie de 60 à 75°, elle est d'autant plus forte que le charbon est plus collant, celle de la grille varie dans le même sens soit de 10 à 50°.

C'est de ces deux éléments que dépend surtout la bonne marche du foyer.

La voûte de l'appareil est percée d'un certain nombre d'ouvertures :

Les unes A sont recouvertes de cloches dont le fond est fermé par des trappes qu'on manœuvre de l'extérieur.

On tient ces cloches ou boîtes de chargement pleines de charbon qu'on fait tomber en ouvrant la trappe. Comme elles sont fermées par

un couvercle, il n'y a pas de rentrée d'air à la manœuvre de la trappe.

Une autre ouverture sert à la sortie des gaz se rassemblant dans le

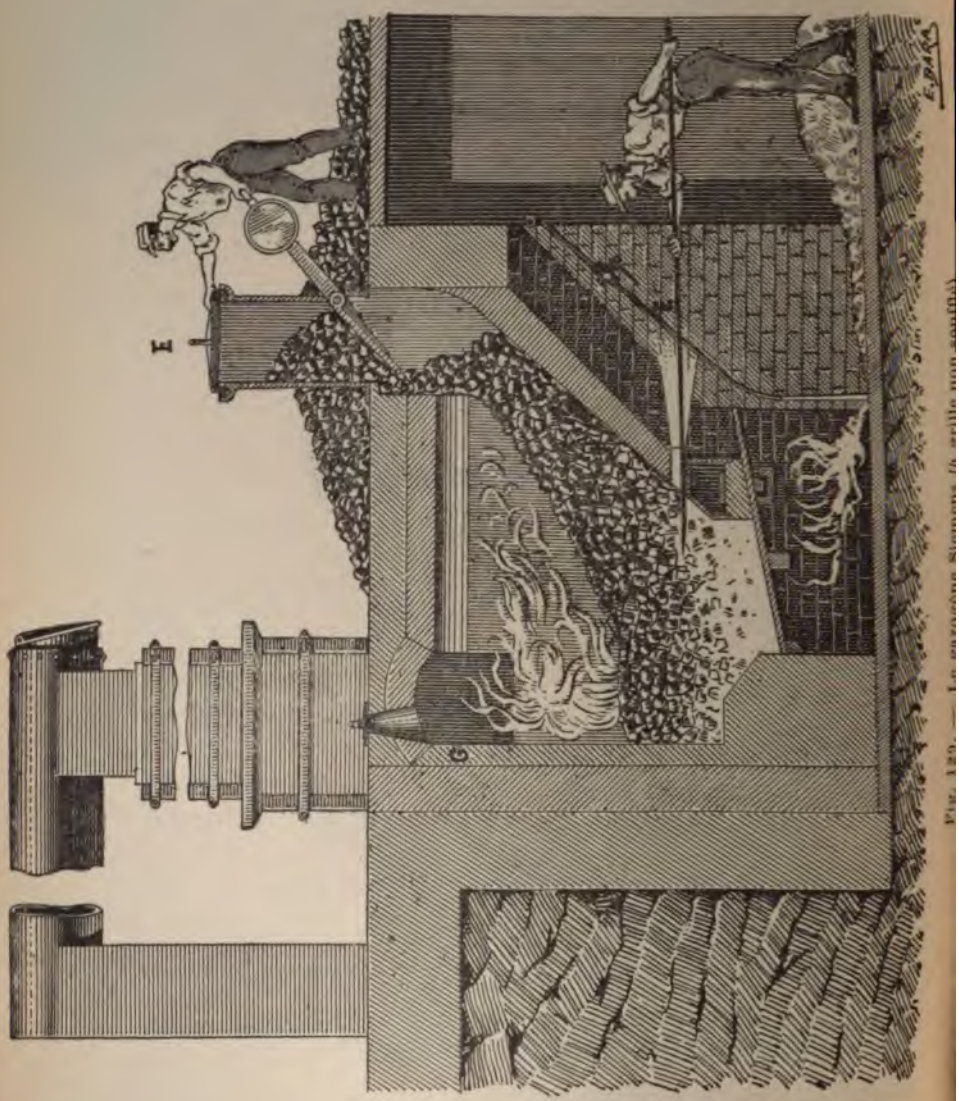


Fig. 129. — Le gazogène Siemens (à grille non soufflé)

tuyau de conduite T ; elle reçoit souvent un registre pour isoler l'appareil des conduites, le cas échéant.

De petits regards fermés par des tampons ménagés également dans la voûte permettent d'observer l'intérieur du four.

Le combustible chargé sur la poitrine glisse en formant un talus plus ou moins incliné et s'étale de lui-même sur la grille après s'être échauffé en descendant. Les hydrocarbures volatils se dégagent dans la partie supérieure de la poitrine où l'air ne peut arriver et s'échappent sans altération. Le charbon porté au rouge arrive sur la grille où il se transforme en oxyde de carbone si la couche est assez épaisse. Dans la région de la grille où il y a excès d'air, il y a production d'acide carbonique qui, traversant lentement une couche fort épaisse de combustible incandescent, se transforme en oxyde de carbone. Une pluie d'eau est souvent disposée à la partie antérieure de la grille ; cette eau très divisée, tombant dans le cendrier, le refroidit et se transforme partiellement en vapeur fournissant par sa dissociation de l'hydrogène qui enrichit le gaz combustible.

B. — *Décrassage de la grille et conduite du gazogène.* — On pratique d'ordinaire le décrassage en introduisant un ringard dans une ouverture ménagée dans la poitrine, ou bien on dispose dans des évidements pratiqués à cet effet une série de barreaux formant fausse grille. Les barreaux de la vraie grille sont ensuite enlevés pour provoquer la chute du mâchefer resté entre les deux. L'arrosage dont nous avons parlé facilite le travail de l'ouvrier, les mâchefers restant moins adhérents à la grille refroidie.

Pour décrasser, le gazogène n'est donc pas mis hors feu, ce qui est indispensable pour la régularité du chauffage.

Il importe aussi en pratiquant le décrassage au ringard de ne pas produire dans le charbon des vides tels que l'air, affluant en grande quantité, puisse brûler complètement le carbone, en donnant de l'acide carbonique et privant, par suite, le courant gazeux d'une quantité appréciable de gaz combustibles.

La préoccupation constante de l'ouvrier préposé à la conduite du gazogène doit être d'éviter la combustion complète du charbon déposé sur la grille. Par suite, le feu ne doit pas *monter aux charges* de combustible ; le chauffeur s'en assurera en inspectant, par le regard ménagé à la partie supérieure, l'intérieur du foyer et en effectuant le plus régulièrement possible les chargements prescrits. Au cas où le rendement en gaz combustibles viendrait à s'affaiblir il faudrait en provoquer un plus fort dégagement, non en activant le feu comme pour une grille destinée à donner directement de la chaleur par une combustion la plus

parfaite possible, mais en chargeant une qualité de charbon plus riche en éléments combustibles et distillant avec facilité.

II. — *Les gazogènes à vent souffle*

Le gazogène *Siemens* que nous venons de décrire est un gazogène à tirage naturel ; c'est l'appareil le plus répandu. Les gaz combustibles qui y sont engendrés en sortent à une température assez élevée favorisant leur ascension vers la sole du four placée à un niveau légèrement supérieur, où s'effectuera leur combustion. On a songé à recourir au *soufflage* pour les motifs ci-après :

a) — **Utiliser des combustibles pulvérulents ou impurs dont** la combustion serait fort difficile avec le tirage naturel, leur poussière en se tassant s'opposant à l'arrivée de l'air.

b) — **Rendre plus régulière la marche du gazogène.** Avec le tirage naturel il y a forcément des variations dans les quantités d'air affluant vers la grille ; quand il y en a excès, une partie des gaz formés se brûle avec production d'acide carbonique et de vapeur d'eau.

c) — **Augmenter le rendement en gaz combustibles,** car le tirage étant plus fort on peut majorer la charge de combustible et élargir la grille en conséquence.

d) — **Rendre supérieure à la pression atmosphérique** la pression à l'intérieur des fours ; ce qui est souvent indispensable dans les appareils servant à l'élaboration des aciers.

A. — *Gazogènes à grille soufflés.* — Pour transformer un gazogène ordinaire à grille en gazogène à grille soufflé, il suffit simplement de fermer hermétiquement le cendrier et d'y placer une tuyère.

Il importe d'établir une nappe d'eau que l'on veillera à maintenir constante afin que le vent soufflé entraîne avec lui une certaine quantité de vapeur ; on évitera ainsi une allure chaude et sèche fort préjudiciable à la bonne conservation de la grille et l'on pourra éteindre promptement les escarbilles lorsqu'on procédera au décrassage.

Le vent, emprunté souvent aux souffleries des hauts-fourneaux, est fourni par un simple branchement sur une conduite existante à l'aide d'un ventilateur desservant toutes les grilles ou à l'aide d'un injecteur

vapeur affecté à chaque grille. L'emploi de l'injecteur Kœrting, par :emple, est fort répandu.

Avec l'avantage déjà cité de fournir de l'air naturellement humide, tte dernière solution assure l'indépendance de chaque grille au oment du décrassage. Il est clair, en effet, que l'on ne peut opérer décrassage de la grille d'un gazogène soufflé sans en interrompre marche ; or, avec un insufflateur distinct pour chaque grille, l'arrêt un seul gazogène pendant le temps strictement nécessaire au décrasge n'est que d'une minime importance.

Dans le cas où tous les gazogènes dépendent d'un unique ventilaur, l'inconvénient est grave ; on ne peut en effet procéder au décrasge sans interrompre la marche générale. On a alors imaginé le dissitif suivant : au lieu de souffler le gazogène par le cendrier éalablement fermé, on laisse au gazogène à grille sa disposition rmale et l'on place sur la conduite qui réunit le gazogène au four ventilateur qui fonctionne comme exhausteur, en aspirant les gaz foyer pour les refouler dans le laboratoire.

Le décrassage peut se faire comme à l'ordinaire sans qu'il soit cessaire d'interrompre la marche.

Il peut arriver que le soufflage favorise la combustion des gaz dans gazogène lui-même ; ce cas se présentera lorsque le combustible ra été chargé *irrégulièrement* ou en *quantité insuffisante*, et aussi rsque les décrassages ayant été trop retardés la grille laissera passer op facilement le vent soufflé au travers des interstices insuffisamment mblés. Pour tirer des gazogènes à grille soufflés le meilleur parti, faudra par suite veiller d'une façon toute particulière à la régularité chargement et à celle des décrassages.

B. — *Gazogènes à cuve.* — Les gazogènes à cuve permettent d'utiser le soufflage sans qu'on rencontre les difficultés de décrassage gnalées ci-dessus pour les gazogènes à grille soufflés.

Le premier de ces appareils fut construit par *Ebelmen ;* c'était un aut-fourneau de dimensions réduites n'ayant pas plus de 4 mètres de auteur. Au combustible étaient mélangés des fondants appropriés desnés à former avec ses cendres des laitiers fusibles qu'on faisait écouler ar le trou de coulée. Ce procédé d'entraînement des cendres à l'état e laitier fusible ne s'est pas généralisé. Dans les gazogènes à cuve tilisés dans la pratique, on enlève les cendres à l'état solide. Pour

cela, les tuyères sont placées assez haut pour que les cendres puissent s'accumuler au-dessous : on les en retire par des portes situées à la partie inférieure de la cuve.

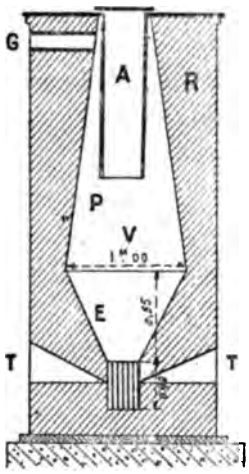
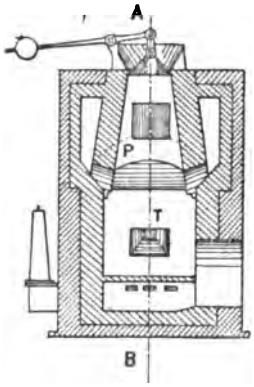


Fig. 130. — Gazogène à cuve.

A, appareil de fermeture et de chargement. — *E*, étalages. — *G*, prise de gaz. — *P*, poitrine. — *R*, maçonnerie réfractaire. — *T T*, tuyères. — *V*, ventre.

Le gazogène *Brook* et *Wilson* que nous avons représenté ci-dessous consiste en une cuve à section rectangulaire ayant au centre une double tuyère alimentée par un injecteur *Kœrting*. Les gaz combustibles s'échappent en gagnant une enveloppe entourant toute la partie supérieure de la cuve et sur laquelle se branche horizontalement la prise de gaz. Dans certains gazogènes à cuve on rencontre quelquefois des *étalages* empêchant le combustible de se tasser devant la tuyère. Quelquefois même les parois de la cuve sont refroidies par un système spécial ; il en résulte que les cendres n'ont plus tendance à s'y attacher et tombent d'elles-mêmes au fond de l'appareil.

Malgré la défaveur qui semble s'attacher à l'emploi des gazogènes à cuve, on a tendance à revenir depuis quelque temps à l'appareil d'*Ebelmen* en utilisant par suite le principe de la scorification des cendres.



Coupe A B.

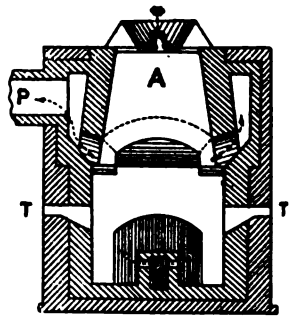


Fig. 131-132. — Gazogène Brook et Wilson.

T, tuyère. — *P*, prise de gaz. — *A*, appareil de fermeture et de chargement.

Il serait d'un intérêt médiocre de décrire les nombreux types de gazogènes existant dans les diverses usines ; nous ne pouvons néanmoins passer sous silence un important essai de gazogène à cuve tenté d'abord à Varsovie et qui s'est répandu rapidement dans un grand nombre d'usines autrichiennes (de Gachter-Ingénieur).

Ce gazogène à cuve est soufflé à l'air, à 80 cm. de pression environ, par quatre tuyères symétriques deux à deux placées à la partie inférieure et sous une charge de combustible d'une hauteur de deux mètres : l'évacuation des scories provenant des cendres du combustible est continue. La scorification est réalisée à l'aide de fondant calcaire, de spath fluor et de scories de fours à réchauffer.

III. — *Le gaz à l'eau.*

La fabrication du gaz à l'eau a pris depuis quelques années une importance considérable.

Les exigences de l'industrie réclament un gaz à puissance calorifique plus forte que celle que procure le gaz des gazogènes fonctionnant à l'air et tels que nous venons de les décrire.

Dans le gaz à l'air, en effet, la proportion d'éléments utiles n'atteint que bien rarement 40 0/0 ; il s'y trouve donc, au minimum, 60 0/0 de gaz inertes : azote, acide carbonique, dont la présence abaisse notablement la température de combustion.

La fabrication du gaz à l'eau est fondée sur la réaction de la vapeur d'eau sur le charbon porté au rouge :

$$C + H^2O = CO + 2H$$

Comme cette réaction s'effectue avec absorption de chaleur, il faut que l'appareil soit chauffé extérieurement.

S'il avait fallu fournir la chaleur nécessaire à la réaction à l'aide d'un combustible brûlé spécialement dans ce but, il est clair que l'opération n'eût pas été industrielle. On a heureusement pensé à utiliser la chaleur emmagasinée dans les gazogènes fonctionnant à l'air soufflé pour produire alternativement dans ces gazogènes d'abord du gaz à l'air, puis du gaz à l'eau. Quand le gazogène, après avoir produit pendant un certain temps le gaz à l'air ordinaire, a atteint une température assez élevée (ce que l'on juge par les regards ménagés dans la voûte), on arrête la

soufflerie et l'on fait arriver un courant de vapeur d'eau. Cette vapeur d'eau, au contact du charbon porté au rouge, se décompose et l'on obtient finalement un gaz dont la composition moyenne est à peu près :

CO.	47
H	46
CO^2	3
Az	4
	100

Il arrive un moment où la température n'est plus suffisante pour que la réaction donnant le gaz à l'eau puisse s'accomplir ; on n'a plus qu'à remettre alors la soufflerie d'air en marche et ainsi de suite.

Comme le gaz d'eau et le gaz de gazogène ont une puissance calorifique bien différente, on les recueille chacun dans un gazomètre distinct.

Le gaz d'air est réservé au chauffage des fours à température relativement basse et le gaz d'eau pour l'obtention des températures très élevées. Nous n'indiquerons pas les nombreux dispositifs employés pour la préparation du gaz à l'eau ; le principe de sa préparation doit nous suffire. Il importait néanmoins d'en signaler l'usage dans les opérations industrielles où l'on a besoin d'obtenir de hautes températures : fours de fusion d'acier, fours de verrerie, etc...

Quoique originaire d'*Amérique* cette préparation de gaz combustible, s'il faut en croire les organes techniques spéciaux, commence à se répandre en Europe. Elle a été utilisée avec succès aux usines d'*Essen* et de *Hoerde*.

IV. — Dispositions générales des gazogènes.

A. — *Groupement des gazogènes.* — Les gazogènes peuvent constituer un groupe unique ou être fractionnés en groupes distincts, chaque groupe desservant un four.

a) Dans les groupements en batterie, les gazogènes sont réunis dans une partie de l'usine éloignée à dessein des fours à desservir ; on recueille tous les gaz dans une conduite unique qui les distribue aux différents fours ; dans cette conduite en tôle se déposent les goudrons et les poussières et le gaz recueilli a une composition plus régulière

parce que les variations de marche des divers gazogènes se compensent.

Par ce dispositif, on perd presque toute la chaleur sensible des gaz, qui se refroidissent avant d'arriver aux fours pour y être brûlés.

On a trouvé, néanmoins, dans les installations récentes, que la chute de température des gaz, due à un développement très coûteux de canalisation, et la condensation résultant d'une forte proportion des hydrocarbures combustibles du gazcompensée par les seuls avantages de propreté des appareils distributeurs et d'absence de poussières dans les divers éléments des fours, étaient un calcul d'une économie fort discutable:

Aussi, abandonne-t-on de plus en plus cette solution dans les installations nouvelles.

b) **On préfère placer non loin de chaque four** les gazogènes destinés à les desservir ; c'est le système des gazogènes accolés aux fours pour que les gaz y arrivent *encore chauds*. Afin de réduire au minimum la déperdition de calorique par rayonnement des conduites, on les construit en briques au lieu de les faire en tôle. La canalisation en briques est mauvaise conductrice de la chaleur, elle est suffisamment étanche et ne coûte pas trop cher.

L'isolement de chaque gazogène peut être assuré à volonté par l'interposition de simples vannes métalliques.

B. — *Tirage des gazogènes*. — On appliquait autrefois pour assurer un bon tirage le système du *siphon*.

Les gazogènes étant au niveau des fours, le gaz recueilli dans le canal collecteur suivait une conduite verticale en tôle de 4 à 5 mètres de hauteur se continuant par un tuyau horizontal suspendu de 10 à 12 mètres de longueur.

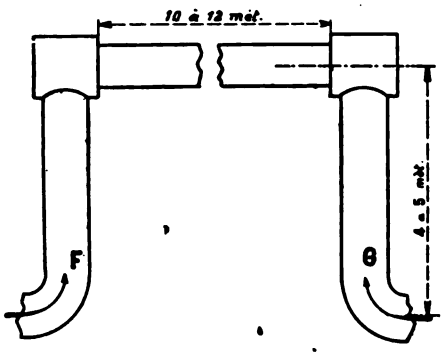


Fig. 133. — Siphon ou cooling-tub de Siemens.

F, four. — *G*, Gazogène.

A son autre extrémité, ce tuyau se recourbait à angle droit et se terminait par un tuyau vertical descendant dont la partie inférieure était reliée au four par un canal établi à niveau du sol.

. Dans son trajet à l'intérieur de ce tuyau réfrigérant (cooling-tub de Siemens), le gaz perdait par rayonnement une grande partie de sa chaleur; par suite, les gaz étaient plus chauds dans la branche ascendante que dans la branche descendante.

L'ensemble des deux conduits verticaux et du conduit horizontal constituait, en somme, un immense siphon dans lequel le mouvement du fluide était assuré par une différence de densité.

L'application de ce principe permit à *Siemens* d'éviter l'emploi du ventilateur pour le transport du gaz des gazogènes au four; mais on remarquera l'inconvénient d'un système qui, pour réaliser le tirage, provoque une chute de température de près de 300°.

Néanmoins un grand nombre d'usines l'emploient encore.

Quand les gazogènes ne sont pas soufflés, le tirage est aujourd'hui

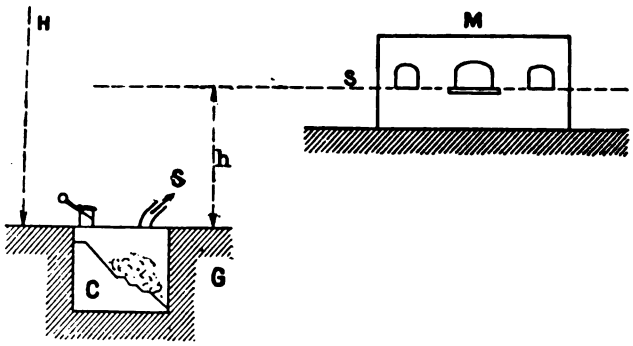


Fig. 134.

C, cendrier. — *G*, gazogène. — *H*, pression atmosphérique. — *M*, four Martin. — *s*, sole. — *S*, sortie du gaz.

le plus souvent assuré en plaçant ces appareils à 3 ou 4 mètres au-dessous du niveau des fours. Si H est la pression atmosphérique au niveau des gazogènes, h la différence de leur niveau avec celui de la sole des fours, δ la densité moyenne du gaz combustible par rapport à l'air. On aura, δ étant inférieur à 1 :

$$H - h\delta > H - h.$$

Il ne devra donc pas y avoir de rentrée d'air dans le four; on s'en apercevra du reste quand les flammes intérieures auront tendance à s'échapper par les joints des portes de travail et de chargement.

Telles sont les considérations générales que nous devions présenter sur les gazogènes, ne pouvant dans le cadre si restreint de notre Traité étudier avec de plus grands détails ces appareils si précieux dans toutes les industries où l'on doit réaliser de très hautes températures.

Nous avons esquissé à grands traits quelques types spéciaux pour donner une idée des principes fondamentaux sur lesquels leur construction est ordinairement établie.

Il resterait à parler, dans une étude complète, des *gazogènes à récupération des sous-produits*. Nous ne pouvons que les signaler, car leur étude ressortit à la chimie industrielle.

Le gazogène *Mond*, par exemple, a été principalement imaginé dans le but d'extraire de la houille les produits ammoniacaux. La distillation du combustible est conduite de manière à obtenir un gaz exempt de goudron et produit à température assez basse pour être aussi riche que possible en ammoniaque.

Ce gazogène, appliqué depuis quelque temps à la fabrication de l'acier, donne aux aciéries un accroissement de bénéfice résultant de la vente des sous-produits.

Article 2. — Les régénérateurs Siemens

I. — Fonctionnement des régénérateurs.

Le laboratoire du four que l'on veut échauffer est placé entre deux appareils que l'on nomme *régénérateurs ou récupérateurs de chaleur*.

Chacun de ces régénérateurs se compose de deux chambres pleines de briques empilées à claire voie.

Le gaz venant du gazogène et l'air venant de l'atmosphère arrivent séparément par deux de ces chambres, celles de gauche par exemple, et pénètrent au-dessus de la sole du four où ils se mélangent.

Supposons que la température du four soit suffisante pour que les gaz venant du gazogène puissent s'enflammer au contact de l'air dans l'enceinte du four : les gaz brûlés quitteront le laboratoire pour gagner la cheminée, sortant *indistinctement* par les deux chambres de droite.

Ils y abandonnent leur chaleur et, au bout d'un certain temps, les briques des chambres de droite deviennent incandescentes. Alors, on renverse le courant en faisant arriver l'air par l'une des chambres de

droite et le gaz par l'autre ; air et gaz se réchauffent récupérant la chaleur emmagasinée pendant la période précédente : les gaz brûlés sortent *indistinctement* par les chambres de gauche et les échauffent à leur tour. Au bout d'un certain temps, les chambres de droite étant refroidies et celles de gauche incandescentes, on renversera de nouveau le courant et ainsi de suite.

La température croît donc à chaque renversement sans qu'on soit cependant autorisé à dire qu'elle *croîtrait à l'infini* si l'on n'était limité par la dissociation des produits gazeux ou la fusion des matériaux réfractaires. Le grand rendement calorifique du four *Siemens* vient de la *multiplication des points de contact* entre l'air et le gaz, *du réglage possible* de la proportion d'air nécessaire pour brûler ce gaz, *de la disposition même du massif* énorme de maçonnerie enfoui dans le sous-sol protégeant contre les pertes par rayonnement à l'aide d'artifices spéciaux de construction, de la *perte minima de chaleur par les gaz brûlés* ne gagnant la cheminée qu'après être presque refroidis et abandonnant une chaleur qu'on utilisera ensuite, surtout enfin *du chauffage préalable de l'air et du gaz combustible avant d'opérer la combustion.*

La considération de la formule donnant la température de combustion permet de montrer que la température croît sans cesse dans le fonctionnement des fours *Siemens*, sans qu'il soit cependant permis de dire qu'elle croîtrait indéfiniment si l'on n'était limité par la fusion des matériaux réfractaires constituant les chambres à briques ou par la dissociation des produits gazeux. Nous ignorons, d'une part, la loi de la variation des chaleurs spécifiques avec la température, obligés de nous en tenir à des valeurs moyennes ou à des formules empiriques péniblement établies, et, d'autre part, nous ne connaissons pas la perte par conductibilité subie par le four *Siemens* et la loi de sa variation avec la température. Il en résulte qu'on peut bien affirmer que les températures croissent, car leur accroissement est d'un ordre supérieur aux erreurs signalées (*du moins dans les limites de température où l'on opère*) ; mais il peut parfaitement se faire que la série formée par les accroissements successifs de chaleur soit convergente et que la température ne puisse croître au delà de toute limite, même si la fusion des briques ou la dissociation n'intervenaient pas.

Ces réserves faites, considérons l'air et le gaz dans le fonctionnement des fours *Siemens*. Supposons-les à même température au début, et à

° . on trouvera pour leur température de combustion une valeur :

$$_1 = \frac{\Sigma.P\,q}{\Sigma.pc}.$$

Après le 1er renversement des valves, l'air et le gaz combustible, au ieu d'être à 0° seront à T degrés quand, après avoir traversé les chambres le récupération préalablement chauffées par les gaz brûlés, ils arrivent ur la sole ; donc, la nouvelle température de combustion t_2 calculée à 'aide de la formule :

$$t_2 = \frac{PCT + P'C'T + \Sigma.Pq}{\Sigma.pc}$$

era plus grande que t_1.

Mais puis $t_2 > t_1$, l'air et le gaz seront à leur tour échauffés par les ıriques à une température $T_1 > T$; donc, la nouvelle température de ombustion t_3 dépassera t_2, par suite aussi les briques communiqueront l'air et aux gaz combustibles une température $T_2 > T_1$, ce qui donıera $t_4 > t_3$, et ainsi de suite.

La formule $t = \frac{\Sigma.Pq}{\Sigma.pc}$ suppose que les produits de la combustion 'ont pas changé entre 0° et t^0. S'il en était autrement, il faudrait enir compte des chaleurs absorbées ou dégagées lors de ces chanements d'état. C'est le cas notamment des corps hydrogénés donıant de la vapeur d'eau.

La dissociation intervient à son tour pour abaisser les températures e combustion au-dessous des nombres théoriques. A partir d'une cerıine température correspondant à la tension de dissociation, la combiaison ne se fait plus et la température ne peut s'élever davantage. 'our des corps hydrocarbonés, par exemple, il reste une certaine uantité d'hydrogène et d'oxygène non combinés qui se comportent omme des gaz inertes.

Quand on allume le gazogène on met tout d'abord sur la grille des ıatières facilement inflammables : bois en brindilles, fagots, etc... t l'on y charge ensuite du combustible minéral en petite quantité. e feu étant bien pris, on augmente progressivement le chargement e manière à provoquer la distillation. Les gaz combustibles produits empliront les conduits et le four à échauffer et, si de l'air y a été dmis en quantité suffisante, ils s'enflammeront à l'aide de la chaleur égagée par la combustion du bois ou du coke placés au préalable sur

la sole. Quand le four sera au rouge, le foyer provisoire sera inutile pour provoquer l'inflammation des gaz combustibles, le régime d'inflammation par la chaleur seule de l'enceinte sera établi.

Les deux chambres de chaque groupe, appelées l'une *chambre à gaz*, l'autre *chambre à air*, sont toujours en communication vers le haut avec les orifices pratiqués d'ordinaire dans les parois verticales du four. Vers le bas, les chambres peuvent communiquer, soit toutes les deux à la fois avec la cheminée d'appel, soit séparément, pour l'une, avec la conduite de gaz venant des gazogènes et pour l'autre, avec l'atmosphère.

L'appareil qui, à un moment donné, permet de relier un groupe de chambres avec la cheminée ou l'intercepter pour les mettre en relation avec les gazogènes ou l'atmosphère se nomme *appareil d'inversion* ou *valve de renversement*.

II. — *Eléments des régénérateurs.*

Nous ne pouvons exposer ici la méthode suivie pour calculer par la théorie, en s'aidant toutefois d'un assez grand nombre de données expérimentales, les dimensions des divers éléments des régénérateurs. Nous nous contenterons d'indiquer les principaux résultats acquis et sanctionnés par la pratique, renvoyant, pour une étude plus approfondie, à la *Métallurgie de Gruner* et à la *Métallurgie générale* de M. U. Le Verrier. La question la plus importante à résoudre a trait à la détermination du poids de briques nécessaire pour arriver à l'absorption complète de la chaleur perdue.

Voici les données principales :

On compte 50 à 60 kilogr. de briques par kilogramme de houille brûlée entre deux renversements de valves.

La surface utile d'une brique étant connue, son poids également, si l'on compte 50 kilogrammes de briques par kilogramme de houille brûlée entre deux renversements, à ces 50 kilog. correspondent 17 briques de surface utile de chauffe que le calcul montre être égale à $1^{m2}30$ environ.

Les empilages de briques dans les chambres étant faits de façon qu'il y ait à peu près moitié vide et moitié plein, le calcul permet de déterminer quel est le rapport entre le volume des chambres réellement

uffées à un moment donné (*soit le volume de deux des quatre cham-s du régénérateur*) et le poids du combustible brûlé.

On trouve qu'il y a avantage à consommer 15 kilog. de houille par tre cube du volume des chambres.

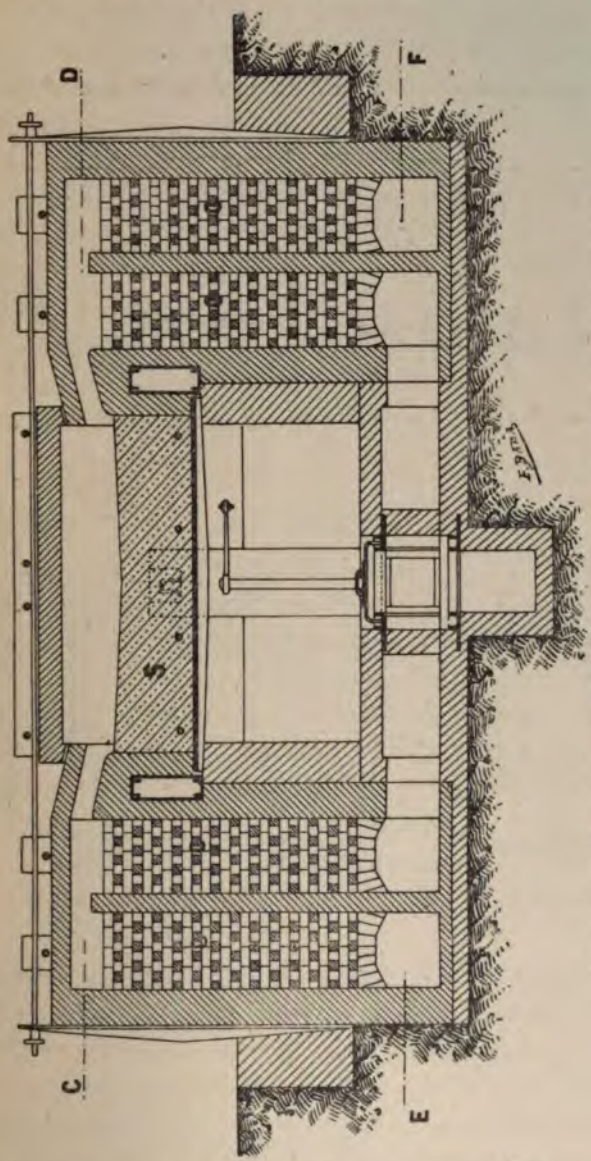


Fig. 135. — Four Siemens primitif à 4 chambres. — Coupe verticale par *A B*. *C C C C*, chambres de récupération. — *S*, sole.

Quant aux dimensions des chambres, leur capacité étant fixée, il n'y plus qu'à déterminer leur section et leur hauteur.

La hauteur des chambres dépend en grande partie de la disposition des lieux, elle est limitée par l'obligation où l'on se trouve de les placer le plus ordinairement au-dessous du niveau du sol de l'usine.

Cette hauteur varie entre 2 et 3 mètres.

La hauteur étant déterminée par des considérations souvent obligées, la section en résulte ; elle est très souvent carrée.

En construisant un four, on fera bien de donner aux chambres un

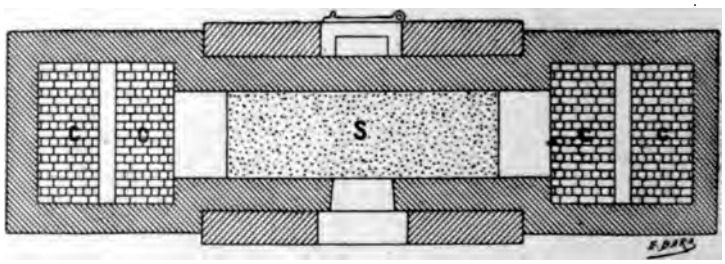


Fig. 136. — Four Siemens primitif à 4 chambres. — Coupe horizontale par *CD*.

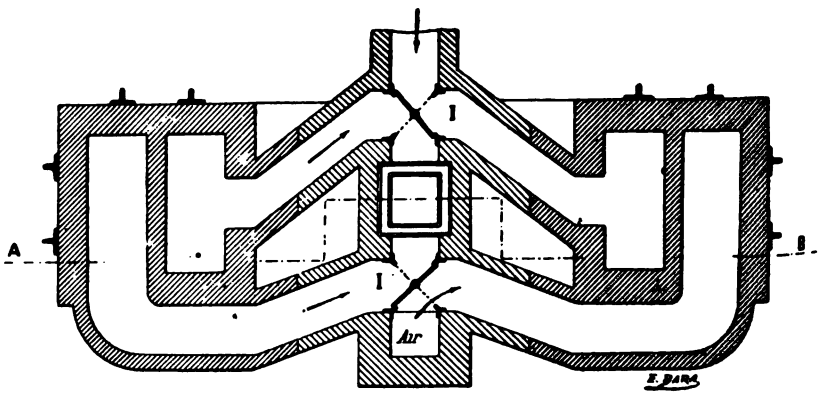
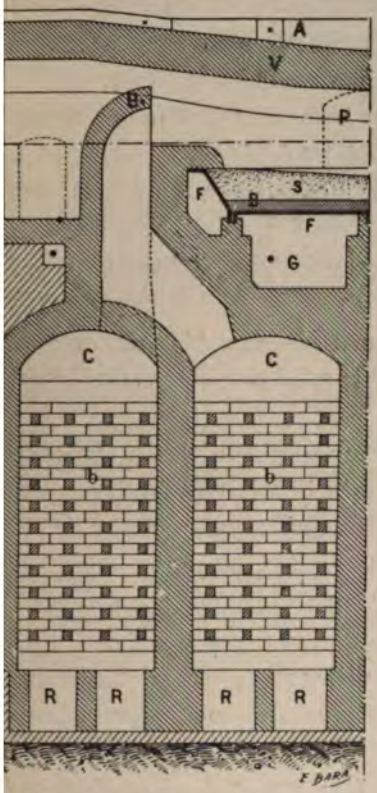


Fig. 137. — Four Siemens primitif à 4 chambres. — Coupe horizontale par *EF*.

volume plutôt exagéré. On ne les remplira de briques que sur une partie de la hauteur et, plus tard, si l'on veut activer la marche du four, on n'aura qu'à en ajouter dans la partie libre pour augmenter le volume utile des chambres (*V. Le Verrier*).

On attribuait autrefois aux chambres à air des dimensions un peu plus grandes qu'aux chambres à gaz (1/10 à 1/7 en plus), et cela parce que les gaz arrivent déjà chauds et que l'air arrive froid ; on réservait ainsi à l'air une surface de chauffe un peu plus grande. Il semble qu'on

ctuellement à ce mode de construction dans les installations



– Régénérateur Siemens perfectionné. coupe verticale médiane parallèle au té du four.

P, porte principale de travail.

V, voûte du four en maçonnerie réfractaire.

A, armature extérieure métallique (fer et fonte).

F, Support et paroi de sole, en fonte.

B, revêtement en briques.

S, Sole en pisé siliceux ou en briques basiques.

B_1, brûleurs.

C, chambres de récupération (de gauche).

b, briques en chicanes.

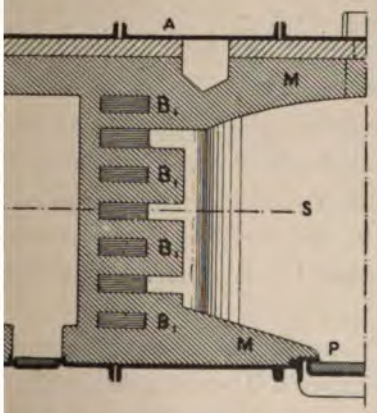
M, parois du four en maçonnerie.

N, niveau du sol de l'usine.

H, hauteur du four au-dessus du sol de l'usine : 2 mètres environ.

R, chambres de dépôt de poussières.

G, gaîne de refroidissement à air.



– Régénérateur Siemens perfectionné. mi-coupe horizontale médiane.

P, porte principale de travail.

S, sole.

B_1, brûleurs.

A, armature extérieure métallique (fer et fonte).

M, parois du four en maçonnerie.

L, largeur du four : de 2 mètres à 2m50 environ.

nouvelles où l'on rencontre des chambres à air ayant souvent les mêmes dimensions que les chambres à gaz. Les régénérateurs sont placés maintenant sous les fours; il n'en était pas ainsi autrefois, comme on l'a vu dans une des figures qui précèdent.

Les cloisons qui séparent les chambres sont perpendiculaires à l'axe du four, la longueur de celles-ci étant égale à la largeur du four. L'épaisseur des murs extérieurs est de 70 à 80 cm.; ces parois sont en maçonnerie massive ou cloisonnée avec interposition d'une lame de sable isolante. La même précaution est prise pour l'obturation provisoire des portes de nettoyage.

Cette forte épaisseur et ces matelas de sable ont uniquement pour but de donner à la construction la solidité voulue et de réduire les pertes de chaleur au minimum.

En avant des chambres se trouvent généralement, dans le sous-sol de l'usine, de vastes couloirs (nouvelle installation du Creusot), on en rencontre également de transversaux pour la surveillance de ces appareils. Bien que la chaleur y soit fort sensible, on peut néanmoins y circuler sans trop de gêne pendant un temps assez court, grâce à la forte épaisseur de la maçonnerie.

Dans les larges couloirs parallèles aux grandes dimensions des fours on remarque les valves hydrauliques de renversement dont la description est donnée plus loin.

Les figures 135, 136 et 137 montrent la disposition adoptée par *Siemens* lorsqu'il créa son régénérateur.

III. — *Disposition des briques.*

Nous avons déjà signalé, lors de l'étude des appareils à air chaud des hauts-fourneaux, l'inconvénient du dispositif en chicane. On sait, en effet, que les poussières finissent par obstruer les chambres et diminuent leur faculté d'absorber la chaleur : le nettoyage ne peut alors se faire qu'en démolissant l'appareil tout entier. Un palliatif employé a consisté dans l'emploi de briques taillées en biseau.

La figure 140 montre ces briques coupées dans les rangs pairs et en élévation dans les rangs impairs. Dans les dispositifs nouveaux on a renoncé, comme dans les appareils *Cowper* perfectionnés, à la construction en chicane.

Le massif en briques est constitué par une série de murailles à angle droit divisant les chambres en conduits verticaux, ces murailles étant portées sur de petites voûtes qui permettent de faire communiquer tous ces conduits par le bas. Il suffit de passer de temps en temps une râclette dans ces conduits parallèles pour les nettoyer.

Les poussières tombent dans des chambres de dépôt disposées au bas des récupérateurs, s'ajoutant à celles qui y

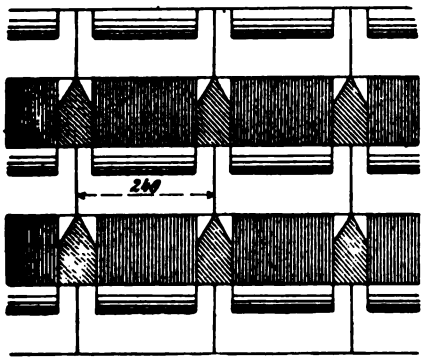


Fig. 140.

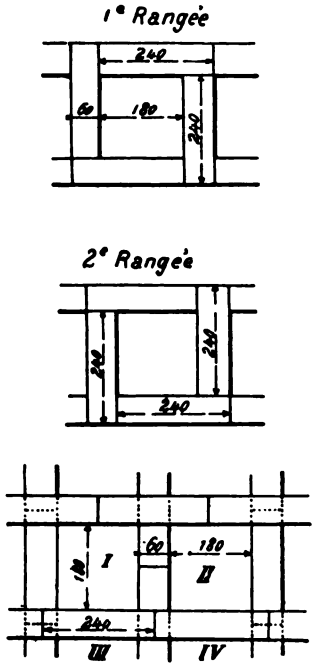


Fig. 141.

sont directement tombées en cours de travail; elles en sont retirées par de petites portes situées dans le sous-sol.

Pour prolonger le contact des gaz avec les briques et se rapprocher sans trop d'inconvénients du dispositif en chicane, on coupe souvent les chambres en deux ou plusieurs compartiments par une cloison horizontale fendue près des murs maîtres. Les gaz ne suivent plus alors un chemin direct et, restant par suite plus longtemps au contact des briques, ils les réchauffent mieux.

IV. — *Disposition des brûleurs.*

On s'est ingénié à disposer au mieux les arrivées d'air et de gaz combustibles pour assurer la combustion de ces derniers dans les meilleures

conditions possibles. Nous décrirons rapidement quelques-uns des dispositifs employés.

A. — *Jets parallèles et voûtes surbaissées.* — Une série de conduits verticaux amène l'air et le gaz par jets parallèles et alternés. Les gaz combustibles ayant, comme on sait, une densité moyenne inférieure à celle de l'air, ont tendance à monter. Si la voûte est surbaissée, le courant gazeux s'infléchira et se mélangera à l'air. L'inconvénient de cette disposition des brûleurs consiste dans la dégradation très rapide des voûtes du four sans cesse heurtées par le courant gazeux surchargé de poussières.

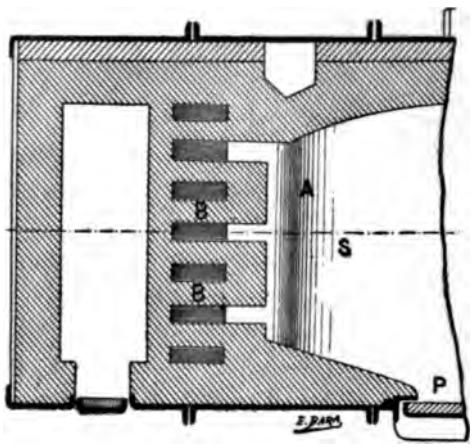


Fig. 142.

B B, brûleurs. — *S*, sole. — *P*, porte de travail. — *A*, Autel.

B. — *Inclinaison différente des conduits et voûtes bombées.* — Dans ce dispositif, le conduit de gaz débouche dans le four au-dessous de celui de l'air (fig. 143).

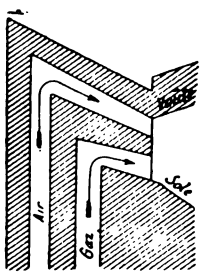


Fig. 143. — Coupe verticale médiane parallèle aux grands côtés.

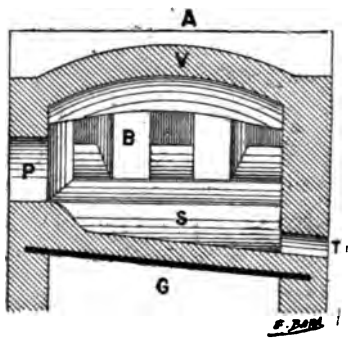


Fig. 144. — Coupe verticale perpendiculaire aux grands côtés.

A, armature du four. — *B*, brûleurs. — *G*, gaine de refroidissement. — *P*, porte de travail. — *S*, sole. — *V*, voûte. — *T*, trou de coulée.

L'obliquité des deux conduits est différente de façon à assurer le mieux

possible le mélange des fluides. On assure, en outre, à la voûte dans la région la plus délicate un refroidissement relatif par le courant d'air qui la rencontre à jet continu.

C. — *Conduits convergents et inclinés vers la sole.* — Dans d'autres fours à voûte bombée, les gaz arrivent par trois conduits convergents situés à la même hauteur et tous les trois inclinés vers la sole (fig. 144).

D. — *Combinaison des dispositions ci-dessus en B et C.* — On peut enfin réunir jusqu'à un certain point les avantages des deux systèmes précédents en adoptant le mode de construction mixte par voûte partie surbaissée et partie bombée, avec inclinaison appropriée des conduits d'air et de gaz.

E. — *Dispositions diverses.* — Les figures ci-dessous donnent enfin divers types fort employés.

Le but généralement poursuivi est de refroidir la voûte par l'air,

Fig. 145.

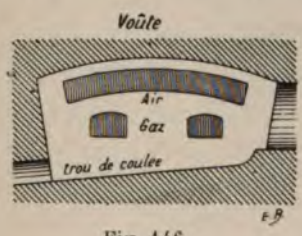


Fig. 146.

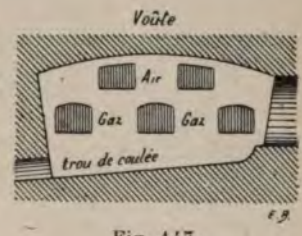


Fig. 147.

de mélanger aussi intimement que possible le gaz et l'air et de concentrer la chaleur très fortement sur la sole.

Les conduites d'air et de gaz sont inclinées les unes par rapport aux autres, convergent vers la sole, etc... ; les constructeurs se guidant d'après les principes exposés ci-dessus.

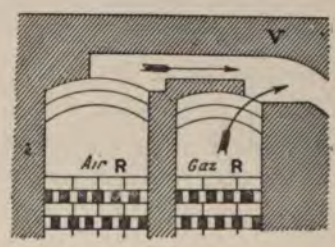


Fig. 148.

V, voûte surbaissée. — *R*, récupérateur.

F. — *Dispositions anciennes.* — Dans les dispositions anciennes, l'air arrive par la chambre la plus éloignée du four et passe, par suite, au-dessus du gaz. Comme le gaz est plus léger que l'air, il tend à s'élever et à croiser le courant d'air (fig. 148).

L'inconvénient de ce système est assez grave dans le cas où la pression du gaz vient à diminuer, car il peut y avoir refoulement d'air pénétrant dans la chambre à gaz.

La figure ci-dessus indique la disposition ancienne avec le palliatif adopté pour obvier à cet inconvénient, palliatif consistant à couvrir en partie la chambre à gaz. Le gaz prend alors une vitesse plus grande et le brassage est mieux assuré.

V. — *Valves de renversement.*

Le renversement se fait à des intervalles qui varient entre une demi-heure et une heure ; le volume des chambres de récupération est calculé en conséquence.

Si les chambres ont un grand volume et si les renversements des valves sont espacés, la conduite du four est plus facile, la température du four est plus stable, l'énorme masse de briques à haute température jouant le rôle de régulateur de chaleur.

Si les chambres ont un petit volume et si les renversements des valves sont rapprochés, le four pourra, il est vrai, se refroidir plus vite, mais sa construction, par contre, aura été moins onéreuse. Pour éviter les variations de température dans le four, il faudra avoir recours à des chauffeurs expérimentés dans la conduite des gazogènes.

Si l'on se reporte aux figures qui suivent, on voit que les gaz combustibles venant du gazogène aboutissent à une chambre métallique en communication par un conduit vertical avec la cheminée. Sur ce conduit vertical s'embranchent deux autres conduits allant l'un à la chambre à gaz de droite, l'autre à celle de gauche. Au point de croisement se trouve une valve qui peut prendre successivement deux positions à angle droit par une rotation autour d'un axe perpendiculaire au plan de la figure.

Dans la position choisie, la chambre à gaz de droite communique avec les gazogènes, tandis que la chambre à gaz de gauche est en relation avec la cheminée. Par une rotation de 90° autour de son axe la valve inverserait les communications.

Pour compléter l'explication ci-dessus, il faut imaginer une coupe analogue parallèlement à celles que nous avons figurées, mais pratiquée dans l'appareil à air.

Le conduit d'amenée de l'air passe en effet *par une valve semblable,*

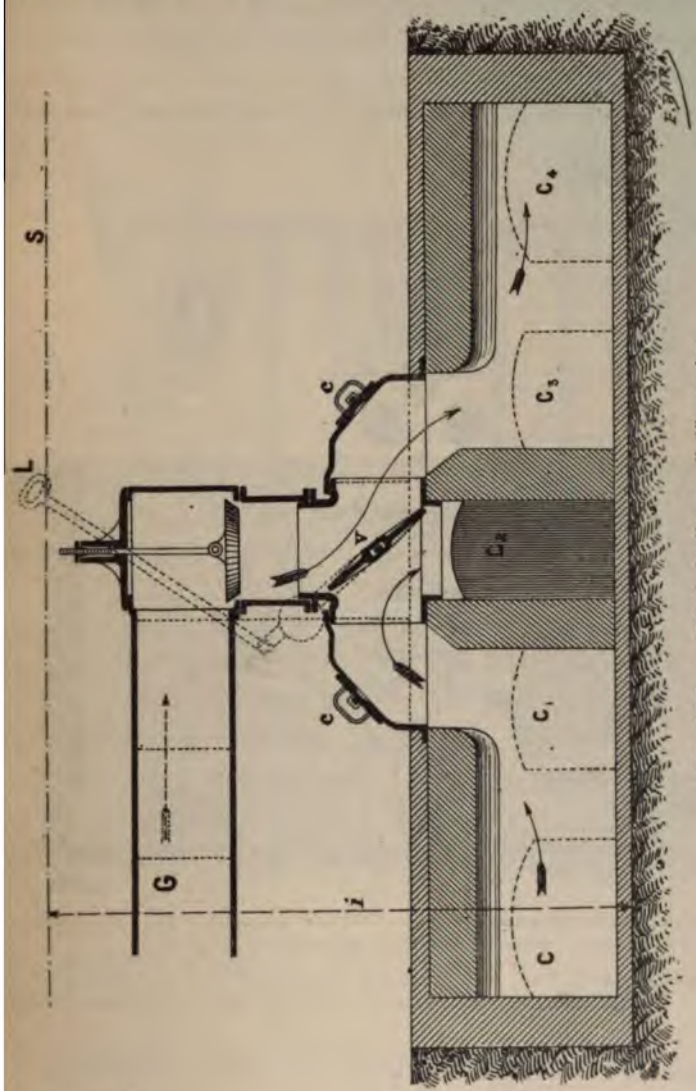


Fig. 149. — Détail de l'appareil d'inversion.

c c, clapets de nettoyage. — *C*, conduite allant à la chambre à gaz de gauche. — C_1, conduite allant à la chambre à air de gauche. — C_2, conduite allant à la cheminée. — C_3, conduite allant à la chambre à air de droite. — C_4 conduite allant à la chambre à gaz de droite. — *G*, gaz combustibles venant des gazogènes. — *i*, infrastructure du four. — *L*, levier de manœuvre. — *S*, niveau du sol de l'usine. — *V*, valve.

et il suffit de les tourner toutes deux pour produire le renversement des courants.

On voit aisément les inconvénients de ce système, l'ajustage des différentes parties de l'appareil ne pouvant se faire qu'assez imparfaitement. Les valves à gaz sont rapidement encrassées par des goudrons mélangés de suie quand l'allure des gazogènes est chaude. Le gaz

combustible s'enflamme près des joints, la chaleur dégagée par la combustion pouvant porter la valve au rouge. Il y a des pertes forcées de gaz, puisque, au moment où la valve pivote, le gazogène communique directement avec la cheminée.

Pour tous ces motifs on préfère utiliser les *valves hydrauliques* dont

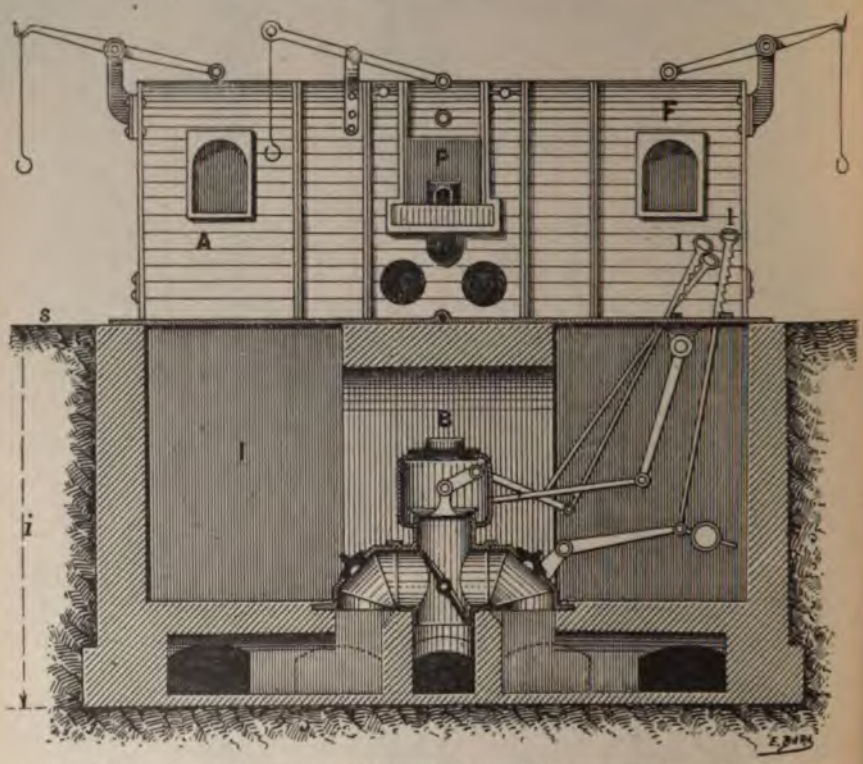


Fig. 130. — Vue d'ensemble dans laquelle la conduite amenant le gaz combustible du gazogène est perpendiculaire au plan de la figure.

A, armature métallique du four. — *B*, appareil d'inversion. — *F*, four Martin. — *i*, infrastructure. — *L L*, leviers de manœuvre. — *P*, porte de travail. — *S*, sol de l'usine.

nous allons donner le principe. On vient d'en installer récemment au *Creusot* dans les nouvelles Aciéries qui ont été construites, à tous les points de vue, d'une façon remarquable.

Le fonctionnement des valves hydrauliques est fort simple ; considérons seulement la valve à air.

Une tour cylindrique en maçonnerie est divisée par deux murs déterminant, suivant deux diamètres rectangulaires de la section droite, quatre conduits verticaux. Le sommet de la tour est recouvert par une

ıe dont les parois plongent dans des rigoles pleines d'eau : cette ıe porte une cloison diamétrale plongeant dans la rigole moins

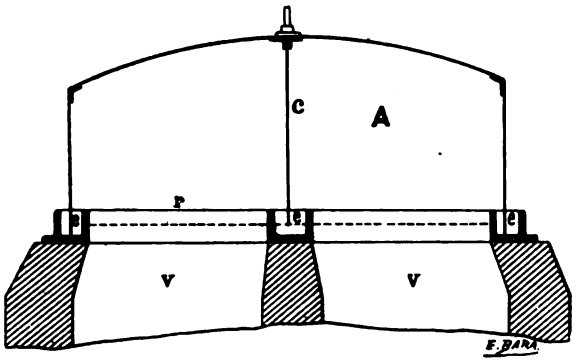


Fig. 151. — Valve hydraulique de four Siemens (valve à air). — Coupe.
cloche métallique en tôle rivetée. — *c*, cloison diamétrale. — *eee*, eau. — *r*, rigole. conduit vertical.

ondément que ses parois, de manière qu'en la soulevant, on peut

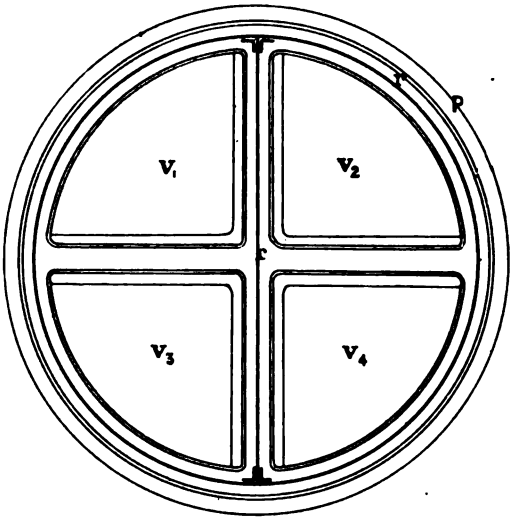


Fig. 152. — Valve hydraulique de four Siemens. — Plan.
cloison diamétrale. — *P*, paroi de la tour. — *r*, rigole. — V_1, conduit vertical comiquant avec la chambre à air de gauche. — V_2, conduit vertical communiquant avec gistre de prise d'air. — V_3, conduit vertical communiquant avec la cheminée. — V^4, uit vertical communiquant avec la chambre à air de droite.

égager de la rigole où elle plonge sans que le pourtour de la cloche e de la rigole circulaire.

Dans le cas de la figure, la chambre de droite recevra de l'air froid et celle de gauche communiquera avec la cheminée.

Si on soulève la cloche et qu'on la fasse tourner de 90°, le courant s'établira dans le sens inverse.

La valve à gaz est identique, on peut l'accoupler avec la valve à air et les faire manœuvrer simultanément.

Dans le même ordre d'idées, on a imaginé une cloche double qui, par un simple mouvement de 180° autour de son axe, distribue en même temps le gaz et l'air.

Ces appareils présentent toutefois un inconvénient, de peu d'importance, il est vrai, si on le compare à leurs avantages; ils se prêtent difficilement aux nettoyages.

Article 3. — Four Biedermann et Harvey

En 1889-1890, la maison *Siemens* annonçait qu'à la suite d'un perfectionnement apporté aux fours à gaz, on pouvait *réaliser désormais*

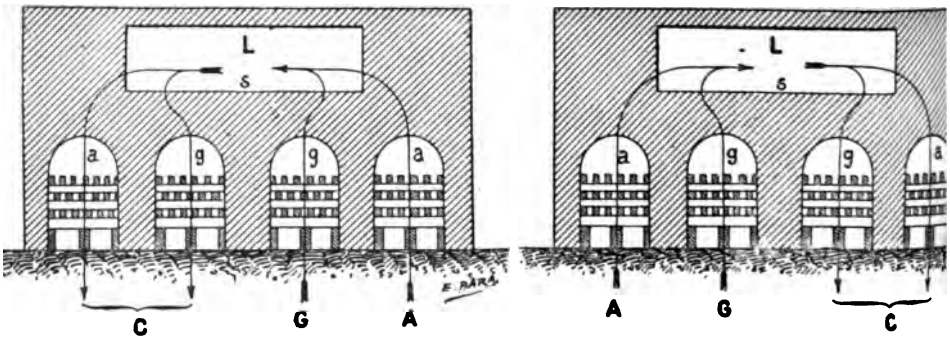


Fig. 153 et 154. — Four Siemens ordinaire. — Schéma du fonctionnement.

a a, air. — *A*, atmosphère. — *C*, cheminée. — *G*, gazogène. — *g g*, gaz. — *L*, laboratoire — *S*, sole.

une économie de 50 0 0 dans la dépense de combustible. Nous allons voir, dans ce qui va suivre, quelle est au juste la valeur du nouveau procédé.

Pour une étude approfondie de la question, on ne saurait mieux faire que de se reporter à un important mémoire de M. l'Ingénieur *Damour* paru en 1893 dans les *Annales des mines*.

Rappelons, d'abord, par un croquis schématique, la disposition classique et le fonctionnement des régénérateurs *Siemens*, tels que nous les avons antérieurement décrits.

Dans le perfectionnement apporté, on fait repasser sous le gazogène une partie des produits brûlés, de façon à régénérer l'acide carbonique par la réaction de ce gaz sur le carbone porté au rouge :

$$CO^2 + C = 2\ CO.$$

Les croquis ci-dessous donneront une idée des nouvelles dispositions imaginées par les inventeurs.

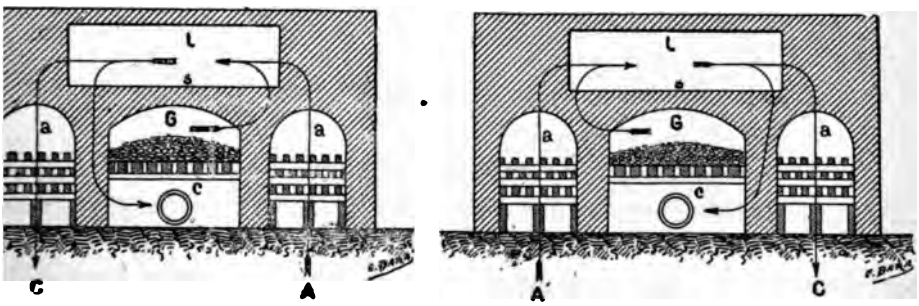


Fig. 155 et 156. — Four Biedermann et Harvey. — Schéma du fonctionnement.

a a, air. — *A*, atmosphère. — *c*, cendrier. — *C*, cheminée. — *G*, gazogène. — *L*, laboratoire. — *S*, sole.

A. — *Description du nouveau four Siemens.* Ce nouveau four perfectionné du type *Siemens* est dû à MM. *Biederman* et *Harvey*. Le gaz est produit dans un gazogène placé à côté du laboratoire ; ce gazogène, ainsi qu'on l'a déjà dit, n'est pas uniquement alimenté d'air froid comme il arrive d'ordinaire dans ces appareils.

L'alimentation se fait d'une triple manière :

1° — *Au moyen d'une partie des produits brûlés.* A cet effet, les produits brûlés ne se rendent pas en totalité à la cheminée, une partie est directement injectée sous la grille dans le cendrier.

2° — *Au moyen d'air chaud.* Cet air chaud est pris directement à l'une des chambres.

Ainsi, dans le four Biedermann, on peut alimenter les gazogènes à volonté avec de l'air chaud ou des produits brûlés.

Ce dispositif, consistant à pouvoir lancer de l'air chaud à l'aide d'un

injecteur spécial, est une modification aux plans primitifs tels que les ont publiés MM. Pouff et Head.

Dans les premiers fours, on se bornait simplement à injecter dans le gazogène une partie des produits brûlés, et c'était cette opération spéciale qui constituait le fond même de l'invention. La modification nouvelle, consistant à pouvoir alimenter le gazogène d'air chaud, a été d'une importance capitale et l'on peut dire qu'elle a transformé le nouveau four.

3° — *Un troisième injecteur* placé dans le cendrier aspire de l'air froid et permet de régler plus aisément l'admission d'air et, par suite, la quantité de gaz produits : il permet surtout de refroidir le cendrier qui ne tarderait pas à se brûler, alimenté exclusivement d'air chaud et de produits brûlés.

B. — *Fonctionnement de l'appareil.* — Dans la pratique des fours actuellement en usage, on procède comme il suit :

Les deux injecteurs communiquant des cendriers aux chambres sont constamment ouverts, insufflant à peu près quantités égales d'air chaud et de produits brûlés ; mais ces gaz étant l'un et l'autre à des températures trop élevées, on les dilue d'air froid, et pour cela on se sert du 3e injecteur, de façon à obtenir sous le cendrier une température d'environ 450°. Dans ces conditions, la proportion de produits brûlés repassant sous la grille est très faible par rapport à la masse des gazéifiants, environ 1 5 de produits brûlés contre 4 5 d'air chaud ou froid. Le gaz produit est cependant plus chargé de CO^2 que celui d'un gazogène ordinaire et en contient de 9 à 11 0 0. Mais, en résumé, l'allure du four est assez régulière et la consommation de houille n'est pas plus élevée que dans un four de type ancien.

C. — *Critique du four Biedermann et Harvey.*— Le grand avantage de ce four paraît surtout résider dans la réunion de toutes les modifications utiles apportées successivement aux fours Siemens et que nous avons signalées dans le cours de notre étude au sujet de ces appareils, et non dans l'emploi de l'acide carbonique comme gazéifiant, ainsi qu'on le fera voir.

En ce qui concerne les pertes de chaleur par refroidissement, on peut dire que la condensation des appareils est aussi complète que possible et qu'il n'existe pas de four à régénération présentant une surface moin-

dre. Le rayonnement des gazogènes est limité à deux parois, la façade et la paroi supérieure ; celui des chambres est très diminué, car elles ne constituent plus qu'un seul groupe.

Les moyens tentés jusqu'ici pour l'enrichissement des gaz ont été rassemblés dans le nouvel appareil : on peut injecter de la vapeur d'eau en telle quantité que l'on jugera nécessaire, puisqu'il y a trois *Kœrting* pouvant fonctionner ensemble ou séparément. On peut alimenter le gazogène d'air chaud à température très élevée, puisqu'on le prend au sommet des chambres. Cette injection d'air chaud ne demande aucun carneau ni appareil spécial, il se fait par un simple *Kœrting*, et encore cet injecteur est-il à deux fins, puisque son but est d'insuffler des produits brûlés.

Grâce à ce dispositif, on voit que si l'on ne se préoccupait pas de la conservation de la grille, si l'on supposait que, par un artifice quelconque, on puisse maintenir dans le cendrier une température très élevée, on pourrait n'alimenter le gazogène que d'air chaud à la température des chambres avec ou sans produits brûlés. Dans ce cas, le fonctionnement du four serait tel que tout l'air nécessaire à la combustion, aussi bien celui qui sert à la gazéification du combustible alimentant le gazogène que l'air servant à brûler le gaz qui alimente le four, serait chauffé par passage dans la chambre et participerait à la régénération. — Ce serait là un avantage immense.

Une critique qui a bien son prix concerne la présence des injecteurs qui sont fort onéreux en eux-mêmes, s'usent rapidement et exigent une chaudière consommant de la vapeur ; aussi beaucoup d'industriels préfèrent-ils encore le tirage naturel.

Remarquons que l'ensemble des dispositions adoptées dans la construction de ce four à gaz constitue un progrès très réel résultant cependant de la mise en œuvre d'une idée qui, sans être absolument fausse, est du moins d'une valeur et d'un intérêt très douteux et que nous allons examiner.

D. — *De l'emploi de l'acide carbonique comme gazéifiant.* — Malgré tout l'intérêt qui s'attache à cette question, nous ne pouvons donner ici qu'une idée générale destinée à montrer la fausse voie dans laquelle, au point de vue théorique, se sont engagés les inventeurs.

« La promesse de 50 0/0 d'économie sur le combustible était fondée « sur le fait que, d'après la réaction bien connue : $CO^2 + C = 2CO$,

« l'emploi de l'acide carbonique permet avec un même poids de char-
« bon de donner un volume d'oxyde de carbone double de celui que
« donnerait l'oxygène. Le fait est exact et il faut convenir avec
« MM. Siemens que, pourvu que le four ait une température suffisam-
« ment élevée, il n'y a pas impossibilité à alimenter les gazogènes de
« produits brûlés et qu'on peut obtenir par là une quantité de gaz plus
« grande, le gaz pouvant d'ailleurs être aussi riche qu'avec un gazo-
« gène ordinaire. Mais, MM. Siemens ne se sont pas préoccupés de voir
« où était emprunté cet excédent de calories disponibles à la sortie des
« gazogènes, lequel ne peut évidemment venir du combustible ; ils ont
« admis qu'il était puisé dans la chaleur perdue des fumées, et là est
« le point faible du raisonnement.

« Ces calories sont, en réalité, empruntées au four même pour lui être
« rendues immédiatement, parcourant ainsi un cycle fermé, sans aucun
« avantage, ni pour la température du four, ni pour la récupération. La
« quantité d'acide carbonique envoyée dans la grille ne modifie en rien
« celle qui s'échappe par la cheminée, les fumées ne dépendant évi-
« demment que du poids de houille brûlée. L'acide carbonique sous-
« trait aux fumées retourne au four et doit toujours s'échapper par la
« cheminée, et (en supposant le cas de la gazéification par CO^2 seul)
« il en résulte que chaque molécule de carbone passe deux fois dans le
« four, que la masse des fumées se trouve doublée, comme l'est la
« masse du gaz combustible. »

« Il y a là deux effets qui se détruisent. Les inventeurs ont cherché,
« par l'emploi de l'acide carbonique, à récupérer la chaleur sur une
« partie des produits brûlés d'une quantité précisément égale à celle
« qu'on peut détourner de la cheminée, l'effet est donc nul : la régéné-
« ration du carbone n'existe pas. » (*Annales des Mines*, loc. cit., page 126).

Article 4 — Le four Martin proprement dit

I. — *Le laboratoire*

Le four *Martin* proprement dit comprend :

Le *laboratoire*,
Les *piédroits*,
La *voûte*.

e laboratoire est la partie du four où sont placées les matières à auffer et à fondre et dont il faut provoquer la réaction ; c'est là où aborera l'acier.

e laboratoire présente la disposition commune à tous les fours à

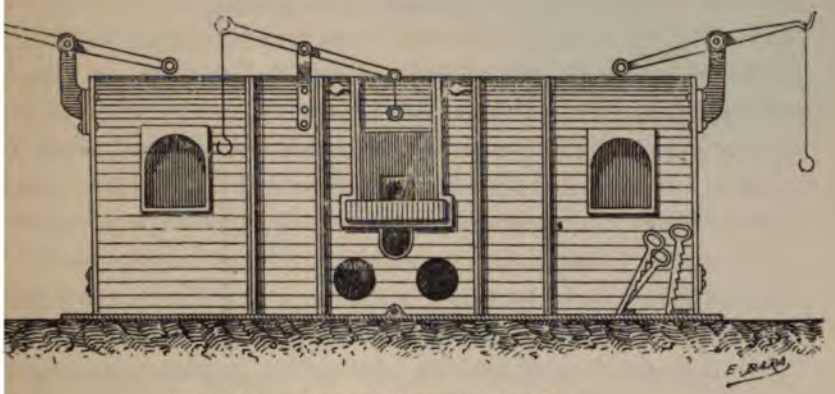


Fig. 157. — Vue extérieure du four Martin.

erbère : il se compose essentiellement de plaques de sole en fonte lesquelles se place un *revêtement réfractaire spécial.*

Nous supposerons pour l'instant ce revêtement constitué en matériaux ceux ; il sera question des *revêtements basiques et neutres* quand us traiterons de la déphosphoration.

La sole est ordinairement divisée en quatre parties soutenues par is piliers disposés de telle sorte que l'air puisse circuler librement dessous et combattre l'échauffement intense auquel elle sera soumise cours de travail.

Les dimensions de la sole varient entre des limites assez larges ; cer-ns fours peuvent contenir jusqu'à 30 tonnes d'acier et même plus ; utres en contiennent à peine 2 à 3 tonnes.

Pratiquement, le rapport de 1/2 environ entre la largeur et la lon-eur du laboratoire semble admis dans les fours récents. La longueur ile entre autels y est rarement inférieure à 5 mètres pour des fours 10 tonnes.

Un certain espace est toujours réservé entre le niveau inférieur des ifices d'arrivée de gaz et d'air, et la ligne d'affleurement normal du in. Cet espace appelé *autel* sert à protéger l'appareil siliceux des ori-es contre les atteintes accidentelles de la scorie.

La sole est, en somme, une sorte de bassin que la nappe de flamme

pourra approcher à la distance convenable d'après l'inclinaison même des orifices d'arrivée d'air et de gaz.

Voyons comment se fait la sole en vue d'une opération.

II. — *Construction de la sole.*

C'est l'opération la plus délicate dans l'établissement du four Martin-Siemens.

Les plaques de fond étant recouvertes avec des briques de silice mises à plat ou de champ, on élève la température du four graduellement avec les précautions usitées, jusqu'à la chaleur de fusion ou à peu près.

On juge, du reste, la chaleur suffisante lorsque le sable spécial dont nous allons dire quelques mots, jeté à la pelle contre les briques de silice garnissant les parois de la sole, commence à y adhérer.

Dès ce moment, on répartit le sable sur le pourtour de la sole par pelletées successives, une couche n'est recouverte par la suivante que lorsque la chaleur a glacé sa surface. On garnit le fond de la cuvette en dernier lieu, parce que la chaleur met plus longtemps à pénétrer le centre que les parties latérales.

Chaque usine possède pour sa sole le mélange de sables quartzeux le plus économique tout en satisfaisant aux conditions d'infusibilité et d'adhérence nécessaires. Selon la qualité des sables, on fait la sole épaisse, moyenne ou mince; elle a de 15 à 20 ou même de 55 à 60 cm. d'épaisseur.

Dans la Loire, le Dauphiné et ailleurs, c'est la terre sableuse de Voreppe. En Angleterre, où la confection des soles est très soignée, c'est le Silver-sand, sable éminemment quartzeux et fin.

Les opérations de sole se font souvent avec les débris finement pulvérisés de briques de silice provenant de démolitions en fin de campagne, débris choisis uniquement parmi les briques de silice pure et débarrassés de toute trace de scorification superficielle.

Quand le four possède son profil intérieur avec son trou de coulée percé au foret, on y fait deux fusions successives de scorie, afin de remplir les solutions de continuité qui ont pu se produire dans la cuisson de la sole.

Enfin, avant d'être mis en allure normale, le four est essayé à des fusions de fonte ou à des opérations de faible tonnage destinées à ne séjourner que peu de temps sur la sole fraîchement construite.

III. — *La voûte.*

ıence du profil sur la durée de la voûte n'est vraiment très que lorsqu'on réalise au four Martin des températures très (déphosphoration sur sole basique). Quand on ne déphos- as, et c'est le cas où nous sommes placé depuis le commen- de cette étude, il semble que quel que soit le profil, une 'oûte peut faire de 400 à 800 coulées.

process et les variantes d'affinage au minerai, en raison du nement intense et des projections auxquels ils donnent lieu, ont à l'emploi de voûtes très convexes ou fort surélevées.

'oûtes très surbaissées offrent l'inconvénient de retarder le ıent du four; d'autre part, la circulation de la flamme peut se trop longtemps entravée par l'amoncellement des éléments de ge.

ɔratique excellente consiste à rendre la voûte du four absolument dante du reste de la maçonnerie. Dans le sens de la longueur, ıge est disposé de telle façon que le contact des têtes de voûte massifs des autels ne s'effectue qu'à haute température.

t aux retombées latérales de voûte, on en reporte toute la poussée armatures en les épaulant directement contre la fonte, et on les s piédroits par une armature complémentaire.

ıareil des piédroits est le plus simple du laboratoire; aussi n'en -nous que pour mémoire.

: la superstructure du four Martin : laboratoire, voûte, piédroits, :t également recouverte extérieurement, au moins du côté du r de travail, avec des armatures ou plaques en fonte consolidées tirants en fer. Souvent même, et pour atténuer les effets du :ment sur les ouvriers tenus à demeurer près du four, la partie ıre de ce four où se trouvent les portes de travail, est recouverte .eaux creux ou caisses métalliques à circulation continue d'air ou

ıargement du four se fait ordinairement par trois portes dont les ions varient avec celles du four lui-même.

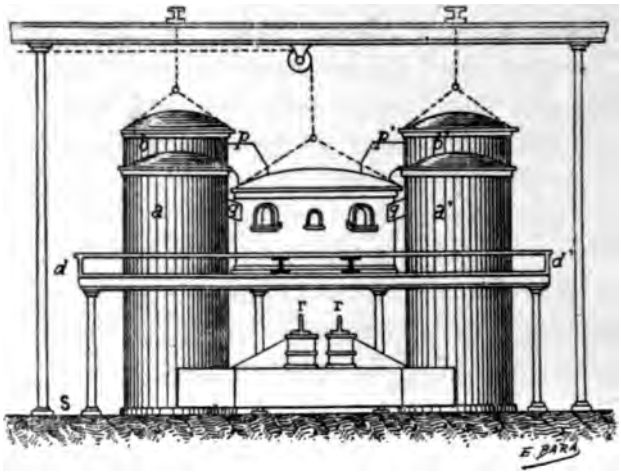
ôté opposé se trouve placé le trou de coulée, au point le plus la sole. De chaque côté sont ménagées des portes plus petites es servant au chargement et au moyen desquelles on fait à la

sole et aux piédroits de la voûte les réparations qui peuvent être tées sans un arrêt complet du four.

IV. — *Type Batho avec brûleurs Hackney.*

Nous croyons utile de dire quelques mots d'une modification apport la construction du four Martin-Siemens et qui est encore peu répand

Dans la disposition Batho, les canaux à air *pp'* et ceux à gaz *qq'*



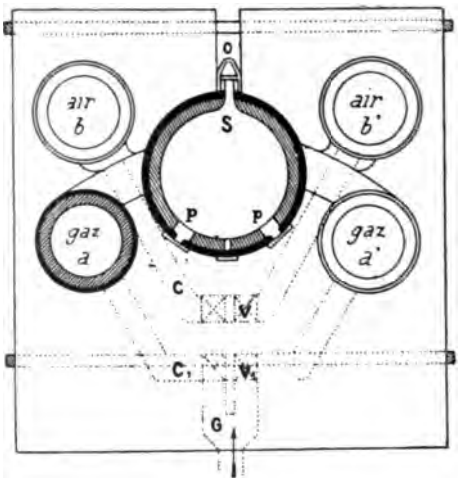


Fig. 158 et 159. — Type Batho avec brûleurs Hackney. — Elévation.

C, conduite d'air. — C_1, conduite de gaz. — *G*, gaz combustible venant des gazogè — *O*, orifice de coulée. — *P P*, portes de travail. — *S*, sole circulaire. — *V*, valves à V_1, valves à gaz. — *r*, *r*, Registres.

nmuniquer les chambres avec le laboratoire sont construits à
:ur, indépendants du four et sans contact entre un canal et l'au-
sont garnis d'un revêtement convenable, de manière à rendre
ble le mélange des gaz et de l'air par suite des fissures. De
tte disposition des canaux rend les réparations beaucoup plus

utre, on a adopté pour les chambres régénératrices la disposition
une chambre à l'autre ; ainsi qu'on le voit sur la figure ci-dessus,
nbres régénératrices *aa'*, *bb'* restent complètement séparées et
dantes du four de fusion. La sole repose sur une plateforme
d' ; l'espace en dessous du four étant entièrement libre, la sole
aîchie. On obvie ainsi à l'inconvénient d'avoir un poids énorme
geant les chambres, avec la crainte d'infiltration de métal fondu
s chambres, dans le cas du perçage de la sole ou de fractures
four ; la surveillance et les réparations sont beaucoup plus

en quoi consistent les brûleurs type Hackney :
:anaux d'introduction et de sortie des gaz et de l'air dans le labo-
se font en tuyaux lége rs et portatifs en tôle ou en fonte, l'inté-
l'extrémité étant garnis de produits réfractaires et les joints
s par du sable. Aux points d'attache entre les tubes et les extré-
: la chambre de combustion où l'on ne peut établir les joints de
on forme le joint en pilonnant de l'argile réfractaire entre l'ex-
des tubes et des bords en fonte fixés aux parois du laboratoire.
'air arrive verticalement sur le courant inférieur du gaz ; par
:ement à angle droit, on obtient un mélange intime qui favorise
bustion parfaite avec une flamme vive dirigée sur le bain, pro-
ainsi la voûte du four et les ouvertures d'entrée et de sortie
et de l'air qui sont les deux parties les plus délicates et diffi-
maintenir en bon état dans les fours Siemens.
chambres de régénération sont garnies à l'extérieur d'une
pe cylindrique en tôle en forme de tour analogue à celle des
ls Whitwell ou Cowper.
léfenseurs de ce nouveau type de four, que l'on rencontre dans
:s installations à l'étranger surtout, prétendent qu'avec les dis-
ıs adoptées pour les chambres, on n'a plus à pratiquer des
ions profondes dans le sol, comme dans le système ordinaire,
nnant des frais considérables. Il n'y a pas de danger de fissures

et d'obstruction des chambres par infiltration du métal ; le travail des ouvriers est moins pénible, car leurs pieds ne reposent plus sur des plaques métalliques échauffées par les chambres de dessous, etc... Nous renvoyons le lecteur pour de plus amples renseignements à divers articles qui ont paru sur ce sujet, soit dans le *Génie civil*, soit dans la *Revue universelle des mines et de la métallurgie* (Revue de Cuyper — *Liège*).

CHAPITRE II

L'ÉLABORATION DE L'ACIER AU FOUR MARTIN-SIEMENS.

Nous supposons dans ce qui va suivre qu'on n'a pas à traiter des fontes phosphoreuses et que, par suite, le revêtement du four où s'élabore l'acier est *acide*. Nous traiterons dans un article spécial, placé à la fin de ce chapitre, le travail en *déphosphoration*.

Ainsi qu'on l'a dit plus haut, le procédé *Martin-Siemens* comporte plusieurs variantes de travail.

Dans la méthode par *dilution*, on ajoute à la fonte à affiner des déchets de fabrication, riblons de toutes sortes de fer, d'acier ou de fonte, etc... ; c'est le *scrap process*.

Dans la méthode par *oxydation*, on peut non seulement ajouter à la fonte à affiner les corps d'addition précédents, mais encore hâter l'affinage à l'aide de minerai ; c'est *l'ore process*.

Telles sont les deux variantes *principales* de travail.

ARTICLE 1er. — SCRAP PROCESS.

On a vu que dans ce procédé il faut dissoudre dans un bain initial de fonte des riblons de fer, d'acier ou de fonte, des déchets ou rebuts de fabrication, etc...

Il serait difficile, et sans intérêt du reste, d'indiquer la série des dosages possibles pour les diverses matières rentrant dans le chargement du four à l'effet d'obtenir telle ou telle nuance d'acier.

Ces dosages dépendent des approvisionnements des usines en ontes, riblons de fer ou d'acier, chutes de rail, de barres ou profilés divers, *boccages* ou *scraps* provenant de fabrications antérieures xécutées au *Martin* ou au *Bessemer*, etc...

I. — *Nature des approvisionnements.*

A. — *Pour ce qui concerne les fontes*, le bain initial devra se composer de fontes blanches, peu carburées, peu siliceuses, et cela afin de imiter les additions de fer ou d'acier, matières d'un prix souvent plus élevé que les fontes. En admettant même qu'on soit abondamment pourvu le riblons, on peut dire d'une façon générale que les fontes convenant e mieux au four *Martin* sont les fontes blanches truitées. L'oxydation st, en effet, relativement faible dans ce four parce que pour obtenir la empérature élevée dont on a besoin, on ne peut y admettre un trop ort excès d'air et que le métal à l'état fluide y offre peu de prise aux az oxydants.

Aussi l'affinage est-il lent ; c'est pourquoi en employant des fontes lanches ou truitées on aura moins de silicium à éliminer et, par suite, 'opération sera moins onéreuse ; mais, en revanche, on aura des fontes eut-être plus riches en soufre, car on n'ignore pas, qu'obtenues en llure moins chaude, les fontes blanches ou truitées sont plus riches en e métalloïde.

Si l'on recherche d'une façon absolue la pureté des produits, on pourra onsentir à avoir un peu plus de silicium à éliminer, ou bien on ne traiera que des fontes ayant déjà été soumises à un traitement désulfuraeur dont il sera ultérieurement question (cubilot *Rollet*, par exemple).

D'une manière générale, et en pratique courante, les fontes employées uront une teneur en carbone approchant de 2,5 0/0 à 3 0/0, un peu le silicium et de manganèse et aussi peu que possible de soufre et de hosphore.

Le phosphore ne peut, comme on sait, s'éliminer en présence d'un evêtement acide ; quant au soufre, il resterait presque entièrement ans le métal à cause des difficultés de son oxydation. Du reste, on it encore peu fixé sur les réactions concernant ce dernier métalloïde ux hautes températures des fours *Siemens*, et nous ne croyons pas 'on soit définitivement sorti, à cet égard, de la période des tâtonne-

ments. On s'en convaincra aisément dans la suite lors de l'étude des procédés de désulfuration.

B. — *Pour ce qui concerne les additions*, on pourra charger dans le bain de fonte, non seulement des riblons de fer ou d'acier martelés ou laminés, mais encore des *boccages* ou des *scraps* de toutes qualités, dans le cas où l'on fabriquerait des aciers de qualité commune.

Si l'on veut des aciers de meilleure qualité, il faudra additionner les fontes supposées pures de matières également pures : on n'emploiera plus les *scraps* ou *boccages*, mais simplement des riblons de fer ou d'acier.

Enfin, dans le cas d'une fabrication pour aciers supérieurs il faudra ajouter, à côté de fontes de premier choix, des *blooms* de fer puddlé ou de fer brut laminé ou martelé et débarrassé de scories.

En résumé, la méthode acide n'admet dans son chargement que la somme d'impuretés (soufre et phosphore) dont la présence dans le métal est compatible avec la qualité à obtenir, car il est presque impossible de compter sur leur élimination.

II. — *Marche d'une opération.*

Nous distinguerons dans cet exposé :

La fusion des matières,
La détermination du point d'arrêt,
Les additions,
La coulée.

A. — *Fusion des matières*. En principe, il faut proportionner la charge à fondre à la capacité du four. Si le four est de n tonnes, il faudra y traiter une quantité de matières dont le tonnage soit voisin de n, entre $n-1$ et $n+1$, par exemple.

Si un four est trop chargé, on n'échauffera, ni le four, ni le métal, à cause du rétrécissement du passage de la flamme.

Si un four est insuffisamment chargé, on fondra les parois avant d'avoir pu arriver à fondre la charge.

Il faut donc veiller avec un très grand soin aux prescriptions ci-dessus, sous peine de faire un mauvais acier ou de mettre rapidement le four hors de service.

La fonte d'entrée est cassée en fragments de demi-gueusets pesant, en moyenne, une quarantaine de kilog., de forme et de poids toujours maniables. Les fragments de fonte sont lancés à bras ou placés le plus souvent un à un sur le plat d'une pelle à long manche et disposés sur la sole du four où ils doivent être à peu près uniformément répartis.

Les Aciéries nouvelles font usage aujourd'hui d'appareils de chargement de plus en plus perfectionnés, l'électricité est même mise à contribution pour actionner ces chargeurs. Nous ne les signalons qu'incidemment, leur description par trop spéciale nous écarterait trop de notre sujet.

Supposons donc simplement employés les moyens ordinaires.

En quatre minutes un fondeur et ses deux aides ont chargé une tonne de fonte. Au cas où la fonte d'entrée ne contiendrait pas de Mn, on chargerait en même temps une certaine quantité de *spiegel*. En général, et sous les réserves faites plus haut au sujet des proportions relatives de fonte et de riblons, la proportion de fonte chargée varie du quart au tiers de la charge totale.

Les *scraps* et *boccages* divers peuvent être joints à la fonte initiale et chargés comme cette dernière, à froid, dans la proportion d'un tiers au moins de la charge totale ; ils sont placés au-dessus de la fonte. Pour que le déchet ne soit pas trop fort, les valves de gaz et d'air sont réglées de façon à obtenir une flamme fuligineuse carburante pendant tout le temps du chargement et de la fusion.

Quand la fusion est obtenue, c'est-à-dire quand le bain de fonte est arrivé franchement au blanc, soit environ 3 ou 4 heures après l'introduction de la charge, on ajoute pour affiner le bain soit des riblons d'acier plus ou moins doux, soit du fer, soit le mélange des deux dans une proportion dépendant évidemment : *de la température du four — de son allure plus ou moins oxydante — de la nuance des fontes initiales ou de celle des riblons ajoutés en* C, Si, Mn, etc.....

La quantité de riblons à ajouter varie avec celle des *scraps* ou *boccages* primitivement introduits ; elle forme d'ordinaire le dernier tiers de la charge.

Généralement, ces matières ne sont pas ajoutées froides dans le bain, on les réchauffe presque toujours dans un four à réverbère placé en face ou à côté du four *Martin ;* de cette façon, le bain d'acier n'est pas refroidi par les additions.

Cependant, étant donné les allures de mieux en mieux réglées des

régénérateurs, l'obtention de températures de plus en plus élevées réalisables avec des matériaux réfractaires de meilleur choix et des constructions plus soignées, il semble que la nécessité du réchauffage préalable des matières devienne de plus en plus discutable et que le principe de la méthode d'additions restreintes et espacées perde de son importance en présence des résultats obtenus récemment dans un grand nombre d'usines.

B. — *Détermination du point d'arrêt.* — A partir du moment où la totalité de la charge a été introduite dans le four, il faut pouvoir suivre la marche de l'affinage. Pour cela, on prélève un peu de métal à l'aide d'une cuiller recouverte intérieurement de terre réfractaire, on le coule dans une petite lingotière et on le traite comme on l'a déjà expliqué lors de l'étude de l'opération *Bessemer*.

Avec quelque pratique du métier on arrive vite à apprécier, d'après l'angle de pliage de l'éprouvette, l'aspect de la cassure, etc... le degré de dureté du métal.

On peut même fixer, avec une erreur assez faible, la teneur en carbone et juger de celle en manganèse suivant la manière dont l'éprouvette aura supporté le forgeage.

On peut aussi, comme au *Bessemer*, se guider sur la nature de la scorie qui surnage au-dessus du bain métallique : une scorie de nuance claire indique un affinage insuffisant, une scorie brûlée à cassure métallique et terne indique une oxydation trop grande, etc...

Pour les raisons déjà exposées au *Bessemer* acide, on ne peut arrêter l'affinage à la teneur en carbone requise pour la nuance d'acier à fabriquer. On pousse l'opération jusqu'à une limite telle qu'on ait oxydé complètement le silicium et les autres corps contenus dans la fonte, sans que *toutefois le carbone qui s'oxyde le dernier ait été complètement brûlé et cela afin de ne pas brûler trop de fer.*

Pour les aciers durs, demi-durs ou demi-doux, on pousse autant que possible l'affinage jusqu'à une éprouvette contenant de 0,200 à 0,150 0/0 de carbone.

Pour les aciers doux ou extra-doux, la teneur en carbone variera de de 0,150 0/0 à 0,120 et 0,100.

En d'autres termes, l'affinage sera poussé d'autant plus loin que le métal à obtenir devra être plus doux.

Pour arriver à ces teneurs on ajoutera, si besoin est, des riblons

d'autant moins carburés que la prise d'essai aura indiqué un métal plus dur ; mais à des doses relativement faibles, par 100, 200 ou 300 kilogrammes environ.

Ces prises d'essai seront faites en nombre nécessaire pour arriver à une quasi certitude sur l'état du bain en carbone.

Quand on sera arrivé à ces limites extrêmes de décarburation, le *point d'arrêt* aura été obtenu.

Il faut ajouter qu'on aura pu envoyer *au laboratoire de l'usine* une ou plusieurs des éprouvettes d'essai prises en cours de travail. A l'aide d'une machine à percer on y prélèvera quelques copeaux de métal qu'on soumettra à un procédé rapide d'analyse : les résultats seront envoyés à la fonderie et pourront fixer définitivement sur la qualité du métal.

C. — *L'addition finale et la coulée.* — On procédera alors aux additions finales de spiegel ou de ferro-manganèse, selon qu'on voudra obtenir des aciers durs ou des aciers doux, ainsi qu'il a été expliqué lors de l'étude du procédé *Bessemer*.

Ces additions se font, comme on sait, dans le four lui-même ou dans la poche de fonderie au moment où l'on va couler.

Les fontes manganésées servant à l'addition sont d'un prix assez élevé ; or, tout le manganèse qu'elles apportent ne sert pas exclusivement à désoxyder le bain d'acier, il y a une perte que nous allons signaler.

Le métal en fusion est, en effet, recouvert vers la fin de l'opération d'une nappe assez importante de scories plus ou moins oxydées sur lesquelles on ne pourra empêcher l'action réductrice du manganèse de se porter. Pour remédier à cette perte, on a eu l'idée de jeter dans le four, avant l'addition, quelques pelletées de charbon (*coke à l'état de grande division*).

Ce charbon joue un rôle de réduction dans la couche superficielle de scories, dénotant son action en provoquant dans le bain une effervescence assez vive mais de courte durée.

Ce réactif ayant produit son effet; on ajoutera la fonte manganésée dont on pourra réduire la quantité, car on peut admettre que son manganèse servira presque tout entier à désoxyder l'acier lui-même.

Nous voyons là une utilisation fort simple de la réduction par le carbone et qu'on ne peut pas effectuer dans la pratique courante sur une plus grande échelle ; car, si l'on ajoutait dans le four la quantité de char-

bon nécessaire pour la complète désoxydation, le bouillonnement serait trop fort et pourrait être accompagné de projections du métal liquide.

Souvent, au lieu d'une seule addition de coke, on peut en faire plusieurs dans le cours même de l'opération dans le but de diminuer l'action affinante de la scorie et surtout de combattre la formation continue de l'oxyde de fer que l'on ne peut, quoiqu'on fasse, éliminer sûrement par une simple addition de fonte manganésée. En tempérant l'action affinante de la scorie on se propose d'empêcher, le cas échéant, l'oxydation d'un élément étranger facilement oxydable qu'on veut introduire dans le bain d'acier. Cette remarque concerne surtout la fabrication des aciers chromés, le chrome étant un corps éminemment oxydable aux hautes températures. Nous reviendrons du reste sur ce point lors de la fabrication des aciers spéciaux.

Cette utilisation du charbon comme réducteur n'avait pas échappé à M. *H. Sainte-Claire Deville* qui, visitant une aciérie où se faisait une opération *Bessemer*, fut fort étonné, nous apprend M. *Ferd. Gautier*, qu'on ne songeât pas à substituer au manganèse *le charbon*, réducteur remarquable et d'un prix peu élevé. On aurait ainsi trouvé le moyen de désoxyder un bain d'acier économiquement et sans lui laisser du manganèse, ce dernier métal ne pouvant évidemment pas passer intégralement à la scorie.

Nous rappellerons que M. *Valton* avait signalé, en 1866, que « *le carbone agirait comme le manganèse, mais avec production de gaz et explosions* ».

L'important est donc de rendre *pratiquement possible* la désoxydation par le charbon et d'opérer en même temps la recarburation. Il semble que la question ait été résolue par l'opération du filtrage de l'acier.

D. — *Filtration ou carburation directe de l'acier*. En 1890, M. *Thielen*, directeur des Aciéries du Phœnix à Ruhrört, fit une communication au *Meeting International des mines et de la métallurgie* sur un procédé de carburation directe de l'acier.

Ce procédé, dû à MM. Gilchrist et Darby, directeurs de l'usine de Brymbo dans le nord du pays de Galles, et qu'ils appellent la filtration, consiste à faire passer l'acier liquide sur du carbone. L'inconvénient de désoxyder par le ferro-manganèse ou le spiegel est qu'on introduit

nécessairement avec le carbone une certaine quantité de manganèse et presque toujours aussi du silicium.

Nous verrons ultérieurement, lorsque nous traiterons du « *Travail les métaux* » que la présence du manganèse à très petites doses peut, dans certains cas, offrir quelques inconvénients. Or, les procédés fondés sur l'emploi d'une addition finale d'alliages manganésifères donnent des produits tenant une dose minimum de 3 à 4 millièmes de manganèse ; ils ne permettent pas d'obtenir pratiquement des aciers presque exclusivement carburés. La sidérurgie actuelle exige aujourd'hui la production courante de pareils métaux, ils servent de point de départ pour la fabrication de ces aciers nouveaux dont il sera largement parlé dans la suite. Le premier appareil imaginé par les inventeurs consistait en un cylindre de tôle ouvert par le haut et fermé en bas par une plaque réfractaire percée d'un grand nombre de trous : tout l'appareil était d'ailleurs doublé d'un revêtement réfractaire. On le remplissait de la substance carburante et on l'intercalait entre deux poches à acier ; l'une au-dessus contenant l'acier liquide extrait du four où on l'avait élaboré (1), l'autre au-dessous destinée à le recevoir après qu'il avait passé à travers le charbon.

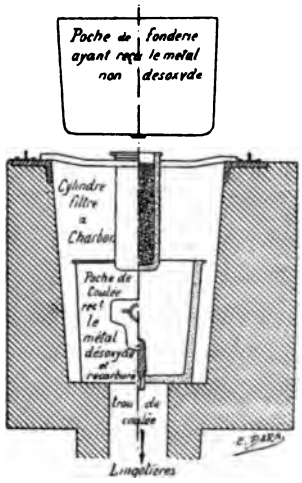


Fig. 160.

L'acier en fusion, en coulant dans les interstices des morceaux de charbon, absorbait le carbone jusqu'à la teneur voulue.

Des expériences ayant démontré que l'absorption du carbone par l'acier était tellement rapide que le temps nécessaire à la filtration n'était pas utile, M. Darby construisit l'appareil représenté dans la figure ci-après.

Dans cet appareil, le filtre cylindrique est remplacé par un récipient convenablement supporté entre le four Martin-Siemens et la poche de coulée. De même que le filtre, il est revêtu intérieurement de matières réfractaires et muni d'une plaque de fond réfractaire percée de trous. Au-dessus se trouve un récipient contenant la matière carburante con-

(1) Four Martin-Siemens ou convertisseur Bessemer.

cassée. Ce récipient est fermé par un tiroir dont l'ouverture plus ou moins grande permet de régler à volonté l'écoulement du carbone dans le récipient placé au-dessus de la poche de coulée, où il se mélange avec l'acier en fusion qui se carbure et s'écoule à travers les trous de la plaque de fond perforée.

En général, on préférait ne pas faire passer tout l'acier à recarbu-

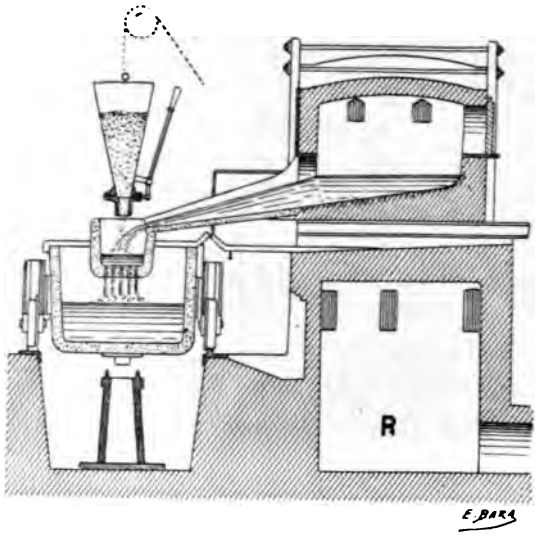


Fig. 161.
R, chambre de récupération.

rer sur le carbone; on ne carburait que le premier tiers de la charge et on lui donnait un degré de carburation tel que les deux autres tiers de la charge d'acier fondu étant ensuite mélangés avec l'acier carburé, on obtînt un bain homogène à la teneur demandée.

La perte de matière carburante par combustion est d'environ 15 à 20 0/0 avec le graphite de cornues à gaz, elle est un peu plus forte avec le coke.

Les teneurs en carbone peuvent varier dans de grandes limites au gré de l'opérateur; M. Darby affirme qu'il peut élever cette teneur de 0,01 0/0 à 1 0/0 en passant par toutes les teneurs intermédiaires.

En dehors de la question de la pureté du métal obtenu, il est certain que celle du prix de revient est aussi à considérer, car les alliages manganésifères coûtent fort cher.

Article 2. — Ore process

La rareté des riblons de fer ou d'acier a obligé les industriels dans quelques districts métallurgiques, en *Angleterre et en Russie* par exemple, à consommer dans l'opération *Siemens Martin* le plus de fonte possible.

Pour arriver à ce but, il a été nécessaire de hâter l'affinage par simple réaction en ajoutant du minerai.

Ce procédé s'appelle « *Ore process* » ; il serait plus exact de l'appeler « *Pig and ore process* », car on affine de la fonte par l'oxygène du minerai.

Cette fabrication, d'abord localisée en *Angleterre*, s'est du reste introduite en *France* ; mais elle n'est pas encore très répandue.

Avant d'indiquer la marche générale de l'opération, il est important de dire que le procédé *à la fonte et au minerai* n'a jamais été appliqué d'une façon rigoureuse. Dans la pratique, le lit de fusion contient 3/4 à 4/5 de fonte et 1/4 à 1/5 de *scraps* d'acier ; on affine ce mélange à l'aide d'une addition de minerai riche égale à 18 à 25 0/0 du poids de la fonte.

I. — *Méthode de travail*

Cette méthode de travail date des premiers essais de M. W. *Siemens* ; elle n'a pas subi de changement appréciable depuis.

Les fontes *(fonte d'affinage et spéciale s'il y a lieu)* et les *scraps* ayant été chargés dans le four, on laisse la fusion s'opérer.

Au bout de 3 ou 4 heures, quand elle est terminée et que la scorie est bien liquide, on charge à la pelle le minerai préalablement concassé en morceaux et par portions de 50 à 200 kilog. suivant la superficie du bain.

Le fondeur juge qu'il en a assez ajouté quand l'ébullition consécutive à cette addition s'est étendue à tous les points du bain d'acier. L'ébullition s'étant calmée et la scorie n'étant plus soulevée que par les nombreuses bulles de CO couvrant sa surface de petites flammes bleuâtres, on procède à un nouveau chargement de minerai.

Quand les bulles de CO arrivent à être clairsemées à la surface du bain, c'est l'indice que la décarburation arrive à sa limite.

On effectue alors des prises d'essai et l'on juge du métal comme il a déjà été dit.

Cela fait on procède aux additions finales.

II. — *Exemple de la succession des opérations d'une coulée à l'ore process* (pour mémoire).

L'opération commencera, par exemple, à huit heures du matin par le chargement de la fonte d'entrée. Admettons qu'il y ait six tonnes de fonte à charger ; adjoignons à ce chargement initial 500 kilog. de scraps de la coulée précédente. On veut fabriquer un acier dur.

Vers midi, si le chauffage a été bien conduit, le bain sera devenu complètement fluide. On commencera alors à introduire le minerai progressivement par pelletées successives.

Supposons qu'il ait fallu 1600 kilog. de minerai pour la décarburation qu'on recherche ; à cinq heures du soir les éprouvettes de coulée dénoteront un acier à 0,25 0/0 ou 0,2 0/0 de carbone. C'est la limite voisine de celle que nous avons indiquée pour les aciers durs quand nous avons exposé les considérations qui guident dans la détermination du point d'arrêt.

A cinq heures un quart le spiegel sera chargé, sa teneur en manganèse aura conduit à en introduire 500 kilog.

Il sera six heures lorsque l'éprouvette finale aura fait voir qu'on est en possession de la nuance d'acier recherchée.

On procédera alors à la coulée.

L'élaboration de cet acier aura exigé dix heures.

III. — *Théorie du procédé.*

On doit à M. de *Ehrenwerth*, professeur de métallurgie à l'Académie de *Leoben*, une étude complète, théorique et expérimentale, de l'*ore process*.

Contrairement à l'opinion généralement répandue avant les expériences nombreuses exécutées à *Gratz* (1881-1882), ce n'est pas directement qu'agit le minerai, mais par l'intermédiaire de la scorie.

Dès que le minerai est au contact du bain, il éprouve une réduction à peu près immédiate ; la scorie surnageant le bain se charge de plus

en plus d'oxyde de fer. Puis l'oxyde de fer de la scorie réagit sur le bain de métal et, tandis que le métal carburé est ainsi affiné, la plus grande partie du fer de la scorie passe dans le métal si l'allure est convenable.

Par suite, la couleur de la scorie devient graduellement plus claire et finit par passer au vert clair.

Mais, pour que ces réactions puissent s'effectuer complètement, il importe que la température soit très élevée. L'emploi de minerais en gros morceaux est à condamner, car ils absorbent en fondant une partie de la chaleur du bain.

Les minerais poreux, employés en petits morceaux se dissolvant rapidement dans la scorie sans provoquer de projections fâcheuses, sont ceux qui conviennent le mieux.

Au point de vue du rendement en fer du minerai, il n'est pas mauvais de l'introduire sous forme de briquettes agglomérées avec du charbon ; le charbon ayant pour but de recarburer le bain et de lui permettre de réduire une nouvelle quantité de minerai.

Enfin, il faut employer, dans l'*ore process*, de la fonte contenant aussi peu que possible de matières scorifiables, c'est-à-dire de silicium et de manganèse ; la meilleure, à ce point de vue, serait une fonte blanche peu manganésée. Quant au minerai, il le faut riche avec un minimum de silice.

La grande quantité de scories qui se forme par le fait même du procédé employé constitue déjà un grand inconvénient, la chaleur pénètre difficilement dans le bain, par suite le temps pour faire une charge est plus long : d'où, prix de revient plus élevé ; il importe donc d'en réduire la quantité. A cause du séjour prolongé des charges dans le four, ainsi que de la forte proportion d'oxyde de fer contenu dans les scories, le revêtement du four est assez fortement attaqué.

Il y a donc lieu d'employer, pour le revêtement des fours marchant à l'*ore process*, des matériaux de choix et beaucoup plus réfractaires que dans le procédé du *scrap*.

Ajoutons, en terminant, que la proportion de houille est naturellement plus forte avec le procédé au minerai qu'avec le procédé au *scrap*, puisque l'opération est plus longue.

En *France*, le haut prix de la houille à gaz et la facilité relative de s'y procurer des *scraps* à un prix inférieur à celui de la fonte ont poussé les usines françaises à l'application du *scrap process* ; pour des motifs contraires, le *pig and ore process* a été en faveur en *Angleterre*.

Article 3. — Emploi des loupes

Les barres, riblons de fer et d'acier du *scrap process* ou le minerai de l'*ore process* peuvent être remplacés par des loupes ou des éponges de fer.

C'est ce qu'on a appelé la troisième variante du procédé *Martin-Siemens*.

Les loupes peuvent être fournies par des fours à puddler à la main ou mécaniques : ces derniers donnent du métal en plus grande masse.

On introduit ces loupes dans le four Martin quand elles viennent d'être cinglées, ou après léger réchauffage si on les a laissé se refroidir.

Les éponges peuvent être fournies par la réduction directe sans fusion de minerais riches, dans les pays où le procédé direct dont nous n'avons pas encore parlé est appliqué.

Loupes et éponges agissent sur la fonte comme le fer en barres mêlé d'oxydes, car les pores de ces masses non cinglées renferment toujours beaucoup de scories.

La réaction est très énergique à cause de l'état de division des particules ferreuses.

Comme dans l'*ore process* avec lequel il a beaucoup de points communs, le procédé des loupes ou éponges favorise la formation d'une grande quantité de scories. Or, cette scorie, qu'il faudrait pouvoir expulser à un moment donné, est le plus souvent visqueuse et s'écoule difficilement par suite d'une température insuffisante ; dans ce cas, comme elle se sépare mal du métal lui-même, elle peut occasionner dans les lingots de graves accidents. Il faudra donc avoir des récupérateurs fournissant beaucoup de gaz riches en éléments combustibles pour disposer d'une température suffisante.

Article 4. — Marche en déphosphoration

I. — *Considérations générales* (1)

Vers 1880, lorsque le succès du procédé *Thomas et Gilchrist* fut bien

(1) Consulter pour la déphosphoration sur sole, comme pour le procédé à *l'ore process*, le mémoire si documenté de M. l'ingénieur Pourcel, paru dans le Bulletin de la Société des Ingénieurs civils.

uré, on pensa généralement qu'il serait possible de faire pour le four *rtin* ce qui avait si bien réussi pour la cornue *Bessemer*. Les usines *Creusot*, de *Montluçon* (Saint-Jacques), de *Fourchambault*, etc... ıstruisirent des soles avec des matériaux basiques et entreprirent la thode de travail en déphosphoration avec des succès divers.

Quoique créé pour déphosphorer, ce procédé n'exige pas des fontes composition déterminée présentant entre leurs divers éléments consıtifs des relations peu variables, comme il le fallait au convertisseur sique. Dans ce dernier appareil, en effet, on devait assurer notamment *teneur convenable en phosphore* pour que la combustion intermoulaire de ce combustible donnât au bain la chaleur nécessaire à sa idité. Au four *Martin*, on sait que la source de chaleur est indépenıte de l'élaboration même de l'acier sur la sole du four.

Une fonte quelconque, pourvu qu'elle ne soit pas notablement sulfuıse ou siliceuse, riche ou non en phosphore, peut être affinée et épurée ıntageusement au four basique.

Le soufre, en effet, ne s'élimine presque jamais complètement ; un ès de silicium donne des scories siliceuses qui ont une action corroe énergique sur les revêtements basiques.

Il est vrai qu'on peut constituer au four *Martin* des revêtements dits *ıtres* avec des matériaux difficilement attaquables ; on pourra, dans cas, y affiner des fontes riches ou non en silicium.

D'autre part, l'allure de cet appareil n'est pas plus rapide que celle four acide, en sorte qu'avec un four de capacité moyenne il est posle d'approvisionner convenablement une aciérie.

Cet avantage n'existe pas pour le convertisseur basique qui doit, pour vailler économiquement, produire 8 à 15 coulées par 12 heures, tan- que le four basique n'en fait qu'une ou une et demie dans ce laps de nps. Ces considérations ont bien leur prix pour les usines qui n'ont s un débouché suffisant pour écouler ou transformer, au fur et à mere de sa production, la grande quantité de métal qu'élabore chaque ır la cornue *Thomas*. Aussi, voit-on se multiplier les fours basiques ns les usines de faible et de moyenne importance ; les cornues Thomas ınt employées par les grandes installations.

II. — *Matériaux de revêtement.*

On emploie pour la sole la *magnésie*, la *dolomie* préalablement cal-

cinée, broyée et mélangée avec du goudron. Certaines usines ont même pu employer des soles en *chaux* faites simplement en calcaire calciné, concassé et fortement damé.

Les différentes substances basiques énumérées sont employées le plus généralement sous forme de briques, quelquefois en pisé.

MM. *Valton* et *Rémaury* eurent l'idée d'utiliser, il y a quelques années, pour la construction de la sole, le minerai de chrome ou *fer chromé*. Il a été établi par ces Ingénieurs que cette matière, telle que nous l'offre la nature, sans aucune préparation, résiste non seulement à l'action de la silice libre aux plus hautes températures de nos foyers métallurgiques, mais aussi à celle des silicates riches en silice que l'on produit dans les fours à garniture siliceuse ou silico-argileuse ; et, qu'en même temps elle n'est pas davantage attaquée, dans les mêmes conditions de température, par les bases énergiques telles que la chaux, la magnésie, etc... ni par les scories basiques riches en oxydes métalliques ou terreux.

Ces remarquables propriétés justifient donc bien le titre de *neutres* qui a été donné aux revêtements faits en minerai de chrome éminemment aptes à résister aux réactions comme aux hautes températures développées dans la marche en déphosphoration.

Les fragments de minerai, de forme généralement irrégulière, sont agglomérés ensemble par un mortier obtenu en mouillant un mélange de minerai de chrome finement broyé avec de la chaux.

Le minerai résiste très bien aux actions corrosives ou du moins ne s'use d'une façon sensible qu'à la longue, mais le mortier qui garnit les joints est assez rapidement attaqué par une scorie fluide et même par le métal. Par conséquent, afin de conserver intact le plus longtemps possible le garnissage neutre, il est absolument indispensable, après l'avoir consolidé par une cuisson de 48 heures au rouge clair, de le recouvrir à chaud d'une couche de quelques centimètres de calcaire ordinaire ou dolomitique broyé, formé graduellement par mises de quelques millimètres. On opère absolument comme pour établir la sole en sable dans le procédé acide. Quand on voudra opérer le traitement acide sur sole neutre on se servira de sable siliceux au lieu d'un sable basique.

On ne peut songer à construire entièrement le four *Martin* en matériaux basiques ou neutres, car en dehors du prix de revient élevé d'une semblable construction, il y a impossibilité de faire la voûte avec des briques de dolomie notamment : leur forme irrégulière provenant du re-

trait de la cuisson ne permet pas de faire un appareillage assez soigné.

Du reste, ces briques exposées d'un côté à une chaleur intense et de l'autre au contact de l'air se cassent vite ; elles n'ont pas l'élasticité de la brique de silice toujours un peu poreuse.

Les briques de magnésie peuvent être obtenues sous forme très régulière mais, par suite de leur faible conductibilité, elles se dilatent mal et se fondent en laissant tomber des voûtes de gros blocs, au point qu'en quelques jours une voûte en maçonnerie serait ruinée par cassure.

Dans la plupart des installations, les carneaux d'arrivée d'air et de gaz ainsi que la voûte sont en briques de silice, les piédroits qui supportent la voûte étant quelquefois en briques de magnésie ou de bauxite constituant comme une sorte de matière isolante non attaquée aux hautes températures, soit par la silice de la voûte, soit par la dolomie de la sole.

La *bauxite*, substance assez abondante en Provence (les *Baux* près d'*Arles*) peut être employée en briques à la place de la magnésie.

C'est un hydrate d'alumine plus ou moins ferrugineux : son emploi pour la construction et le garnissage complet des fours à déphosphorer n'a pas réussi, car elle ne constitue pas une matière franchement basique, l'alumine jouant souvent dans les scories le rôle d'acide.

Il serait du plus grand intérêt de pouvoir construire la voûte en matériaux basiques ou neutres ; car, à la haute température réclamée en marche déphosphorante, souvent les briques de *Dinas* de qualité supérieure coulent. Pour obvier à l'inconvénient signalé plus haut au sujet de l'emploi de la magnésie, on a essayé (M. *Lencauchez*) d'incorporer à la magnésie une certaine quantité de fer chromé réduit en poudre avant le moulage en briques et la cuisson. A très haute température, le fer chromé se ramollit et devient presque plastique quoique restant toujours infusible. Cet état voisin de l'état pâteux retient bien la magnésie et s'oppose à ce qu'elle décrépite ou se disloque en gros blocs.

Nous ne savons si l'emploi de ces briques s'est généralisé, mais nous croyons qu'un grand progrès sera réalisé le jour où l'on pourra construire tout l'appareil du four en matériaux basiques ou neutres capables de résister aux plus hautes températures.

Les seuls revêtements basiques à proscrire sont ceux *en oxyde de fer* parce qu'ils donnent, avec les additions calcaires nécessaires à la bonne marche du procédé, des scories très fluides et très corrosives. Au contraire, les soles basiques ou neutres, de composition d'ailleurs quel-

conque, tendent à se recharger par le dépôt à leur surface de scories très calcaires et très peu fusibles ; il faut les dégager pour les empêcher de monter outre mesure et non pas les réparer comme on le fait pour les soles siliceuses. Une corrosion de la sole indique l'insuffisance des additions calcaires faites en cours des opérations ; cette insuffisance est nuisible au point de vue de la bonne épuration du métal et doit à tous égards être évitée.

III. — *Marche de l'operation.*

A. — *Nécessite de realiser une haute temperature.* — Les difficultés signalées dans l'application du procédé peuvent se rapporter tant aux conditions matérielles d'installation qu'au procédé en lui-même. Il faut, en effet, réaliser dans l'allure déphosphorante une très haute température, les laitiers très calcaires que l'on est amené à produire étant beaucoup moins fusibles que les scories du procédé acide. Il est donc indispensable de munir les fours basiques de régénérateurs relativement volumineux et de les alimenter au moyen de gazogènes capables d'assurer une production suffisamment active d'un gaz riche en éléments combustibles.

B. — *Variantes de travail.* — Le travail sur sole basique ou neutre peut se subdiviser en deux variantes principales suivant que l'on a recours ou non à des additions d'oxydes de fer.

Si l'on n'emploie pas de semblables additions l'action oxydante est exercée exclusivement par l'atmosphère du four, aussi cette formule de travail n'est-elle usitée d'ordinaire que dans les usines où l'on dispose d'une proportion de riblons relativement importante et où, par suite, l'affinage du bain peut être conduit rapidement ; le travail à l'oxyde de fer ou au minerai convient, au contraire, au traitement de charges où la fonte prédomine et quand la quantité de riblons dont on dispose est insuffisante.

On peut ajouter que, pour faciliter l'oxydation du phosphore et hâter son élimination, l'addition d'oxyde de fer ou de minerai paraît s'imposer en allure déphosphorante. Nous ne nous occuperons que de ce dernier cas, le traitement de minerais non phosphoreux sur sole basique ou neutre étant identique au procédé acide à cela près que le métal

u sera plus doux, à cause de l'absence presque complète du sili-

and le four est prêt à recevoir la charge on distribue sur le pour-
de la sole les deux tiers environ du poids total de la castine, on
luit ensuite les gueusets de fonte parmi lesquels on jette le res-
le la castine et quelquefois une partie du minerai mêlés ensemble.
se sert d'oxyde de fer on l'emprunte de préférence à un minerai
ciel préparé en soumettant à une fusion un tas de scories de pud-
et de réchauffage dans le but d'en séparer la presque totalité de
ice.

e fois la fusion obtenue, c'est-à-dire quatre heures environ après
du chargement, on attend que le laitier ne soit plus surnagé par
ragments solides agglomérés de minerai et de chaux, qu'il soit
rmément fluide pour ajouter par pelletées successives le restant du
rai accompagné d'une certaine proportion de chaux cuite.

ajoute quelquefois des briquettes de chaux et de minerai de fer
ment comprimées. On évite ainsi, d'une part, l'entraînement des
sières de minerai dans les chambres de récupération et l'on protège,
re part, les parois du four contre l'attaque de l'oxyde de fer.

us ne reviendrons pas sur l'ordre de l'élimination des métaux et
lloïdes dans l'affinage ; comme au *Bessemer* basique, le phosphore
avant le carbone mais, dans le *Martin*, les laitiers surchargés de
phate quadribasique de chaux sont très fluides, la chaleur fournie
in n'étant plus due à une combustion intermoléculaire mais prove-
d'une source étrangère à l'appareil d'élaboration. Pour empêcher
aitiers basiques de restituer au bain, comme dans le procédé *Tho-*
tout le phosphore qu'ils contiennent par suite de l'action réduc-
exercée par l'oxyde de carbone lors de la décarburation, il est né-
ire de décrasser le bain en les enlevant avec un crochet.

n'est guère qu'une demi-heure ou une heure après la fusion com-
de la charge, quand aucune matière solide ne reste plus attachée
sole, que l'aspect du laitier change à mesure que la chaux s'y incor-
.

ouvrier doit constater qu'aucune matière solide ne reste adhérente
sole en donnant dans le bain un ou deux coups de ringard ; il doit
examiner la texture physique du laitier qui reste collé à l'outil.
difficulté est d'obtenir un laitier suffisamment chargé en chaux et
re en oxyde de fer. Si le laitier est noir et spongieux, c'est qu'il

y a insuffisance de chaux dans le bain ; on en ajoute 100 à 200 kilos. Si l'échantillon qui adhère au ringard présente une cassure compacte de couleur gris foncé, soit une cassure pierreuse, il paraît acquis que la chaux incorporée au laitier y est en quantité suffisante pour la formation du phosphate quadribasique.

On peut alors préparer l'évacuation de ce laitier, soit le *décrassage*.

Pour faciliter cette opération, toujours très pénible, un des moyens les plus pratiques consiste à jeter dans le bain du minerai cru carbonaté en gros blocs. Il se produit une vive ébullition causée par l'eau et l'acide carbonique qui se dégagent du minerai pendant sa fusion dans la scorie et celle-ci dégorge alors abondamment par son orifice de coulée.

On procède ensuite aux additions finales comme on l'a expliqué antérieurement.

Laitier ultra-basique abondant, puis *décrassage* à une phase bien déterminée de l'opération, *telles sont les deux conditions* de réussite de la fabrication sur sole basique ou neutre. Il ne faut pas omettre d'y adjoindre une condition physique qui n'est pas moins importante, à savoir : *la production d'une haute température*.

Si ces conditions sont réalisées, même avec un dosage primitif très phosphoreux, l'acier fondu pourra n'avoir que des traces de phosphore si le laitier contient toutefois moins de 20 à 25 0 0 de silice.

C. — *Sur l'élimination du soufre*. — M. *Harbord* fit paraître, en 1886, dans le journal de l'*Iron and Steel* le résultat de ses expériences sur l'élimination du soufre au four *Martin* basique.

D'après les analyses faites par cet Ingénieur aux diverses phases d'une opération sur sole, il semble que l'élimination de ce métalloïde soit continue : en travaillant à chaud le métal définitif on n'a pas constaté qu'il fût rouverain, bien que la teneur en S des fontes successivement traitées ait été assez importante. Les indications données par M. *Harbord* ne font malheureusement pas ressortir comment le soufre s'élimine, aucun dosage de ce métalloïde dans les scories n'ayant été effectué.

D'après M. *Hilgenstock* (Stahl und Eisen, 1887) la proportion du soufre contenu dans le bain initial diminue pendant la période de fusion pour augmenter ensuite jusqu'à la fin. C'est le contraire de ce qu'avait constaté M. *Harbord*, et cependant, on ne peut suspecter ici l'exactitude

:s analyses, car on constate une variation exactement inverse dans les neurs en soufre du bain métallique et de la scorie. Il semble évident ıe la scorie restitue progressivement du soufre au métal à mesure que proportion du carbone diminue dans celui-ci et qu'elle se peroxyde le-même.

En résumé, l'action oxydante énergique qu'on doit développer pour ›tenir la déphosphoration complète de la fonte arrête cette élimination : ı marche acide du reste, il paraît aujourd'hui acquis qu'on ne peut ıère mieux expulser le soufre.

D'un autre côté, les gaz des gazogènes arrivent aux fours chargés de ›ussières de sulfure de fer, de SO^2 et d'HS. Certains métallurgistes ·étendent qu'il ne serait pas impossible qu'une certaine quantité de :s corps se dissociât aux hautes températures des fours basiques en ıgmentant encore la quantité de soufre restant dans le métal. Il importe ıutefois d'ajouter que, dans la pratique, la plus grande partie des pous-ères et de l'acide sulfureux passe à la cheminée sans avoir pu tou-ıer le bain métallique et sa scorie.

D. — *Nature des produits obtenus.* — Les produits obtenus au four *'artin* basique ou neutre sont caractérisés par une grande pureté. insi qu'il a été dit lors de l'étude du procédé *Thomas*, il est relative-ıent facile d'obtenir des métaux extra-doux.

La paroi n'étant pas siliceuse on peut éliminer presque complètement : silicium et pousser très loin l'affinage, grâce à la haute température éveloppée.

A égalité de teneur en carbone, le métal obtenu sur sole neutre paraît résenter une plus grande résistance que celui obtenu sur sole basique, oit à la rupture par traction, soit à la rupture par flexion, tout en con-ervant la même ductilité.

On attribue ces propriétés spéciales à une légère incorporation dans : métal du chrome entrant dans le revêtement.

La production d'un métal dur présente, du reste, une certaine diffi-ulté : car il faut, par des adjonctions convenables, réintroduire les doses e C et de Mn sans réincorporer Ph. Un second décrassage plus com-let devient nécessaire et souvent même, pour éviter plus encore l'in-uence réductrice sur le peu de laitiers qui restent, il faudra n'ajouter :s matières recarburantes que dans la poche de coulée.

Pour certaines usines, la sole basique n'a d'autre but que d'enlever

les quelques dix-millièmes de Ph qui existent même dans les fontes produites avec les minerais d'*Afrique* ou d'*Espagne* et qui suffisent pour empêcher la réalisation de certaines conditions d'essais ; pour d'autres, la sole basique permet de transformer en acier extra-doux et en fer soudable les fontes les plus phosphoreuses.

E. — *Des fours à sole mobile.* — Au lieu de se faire dans un four fixe l'affinage pourra s'effectuer dans un four à sole mobile, au four *Pernot*

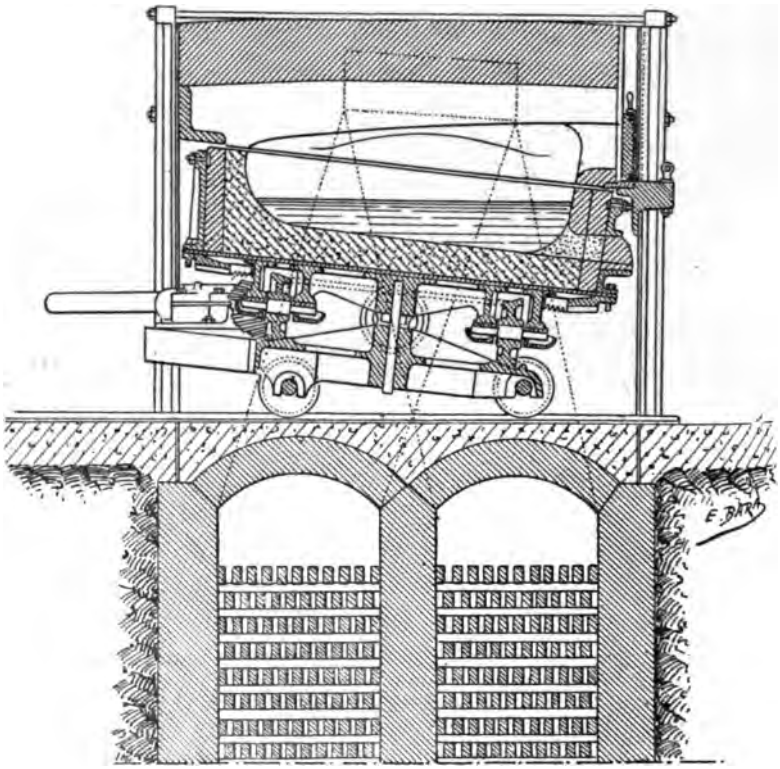


Fig. 162. — Four rotatif de fusion et d'affinage, système Pernot.

notamment. L'appareil est absolument analogue à celui qui est employé pour le puddlage, mais il est muni des régénérateurs *Siemens*.

C'est surtout avec le revêtement basique qu'on pourra avoir intérêt à employer le four Pernot, car il favorise l'action oxydante nécessaire pour la complète élimination du phosphore. En outre, il ne nécessite aucun joint délicat, la sole basique mobile étant séparée par une lame d'air de la voûte siliceuse fixe. Cependant l'entretien fort onéreux d'un

pareil four le fait abandonner en *France* dans beaucoup d'usines, il ne paraît pas en être de même à l'étranger, en *Amérique* notamment (1).

Article 5. — Des additions faites en vue d'un but spécial

L'échelle des aciers au carbone devint bientôt insuffisante pour les divers *desiderata* des métallurgistes : on remarqua que l'introduction à côté du carbone de corps existant ou n'existant pas préalablement dans les fontes d'affinage, procurait aux aciers des propriétés précieuses. Dès lors, apparurent ce qu'on a appelé les *aciers spéciaux;* les uns conservant encore les propriétés caractéristiques dues au carbone amoindries ou modifiées dans un rapport que l'expérience fit connaître, les autres riches surtout en ces éléments étrangers et ne conservant souvent en carbone que ce qu'on n'avait pu leur enlever en affinant les fontes initiales.

I. — *Addition de silicium.*

Nous avons dit que le *silicium* introduit en proportion déterminée dans les aciers leur donnait une grande compacité.

Coulés dans des récipients métalliques en fonte appelés *lingotières*, les aciers ordinaires fournissent une masse métallique de forme simple qui est le *lingot*, présentant à son intérieur et en certaines régions une série de petites cavités appelées *soufflures*.

Il ne nous appartient pas de rechercher ici les causes auxquelles il y a lieu d'attribuer ces défauts : c'est au « *travail des métaux* » que ressortit une pareille étude, nous nous contenterons de constater le fait et d'indiquer le remède.

La présence des soufflures dans toute masse d'acier coulé ne permet pas d'utiliser l'acier brut sortant de son récipient, il faut le forger. Par ce travail mécanique effectué à chaud, on fera disparaître ces cavités dont les parois seront rapprochées en même temps qu'on améliorera les propriétés mécaniques de l'acier.

Or, une pareille façon de procéder est onéreuse : on a recherché

(1) On rencontre en *Amérique* des fours qui basculent soit en roulant sur une voie plane, comme dans les types de *Wellman* et *Stafford*, soit en tournant autour de leur axe sur des galets comme dans le type *Campbell*.

Ces fours oscillants sont souvent munis d'une voûte amovible ce qui permet un chargement rapide et l'utilisation des gros blocs métalliques qu'on n'est plus obligé de briser, au préalable, à la dynamite. En outre, ces appareils, par leur mouvement de bascule, contribuent à la rapidité de la coulée. (Notes sur la sidérurgie en Amérique. — *Head*).

depuis longtemps le moyen de couler l'acier dans un moule à parois en sable, de façon à obtenir *directement* l'objet qu'on se proposait de fabriquer *avec ses formes presque définitives*, ainsi qu'il arrive pour la fonte. C'est en enrichissant en silicium l'acier élaboré par un des procédés quelconques de fabrication qu'on y est arrivé.

L'historique de cette question d'un grand intérêt sera fait dans la seconde partie, au « *Travail des métaux* ».

Cependant, il ne faudrait pas croire que le fait d'obtenir des aciers sans soufflures, susceptibles d'être coulés dans des moules, dispense de la coulée en *lingots* donnant une masse métallique fort éloignée de la forme définitive recherchée pour l'objet en fabrication. *Le forgeage n'a pas simplement pour but de rendre l'acier compact mais aussi de le rendre capable de résister à de grands efforts dynamiques par la transformation moléculaire qu'il subit.* En l'état actuel de la fabrication, et malgré les grands perfectionnements apportés dans les moulages

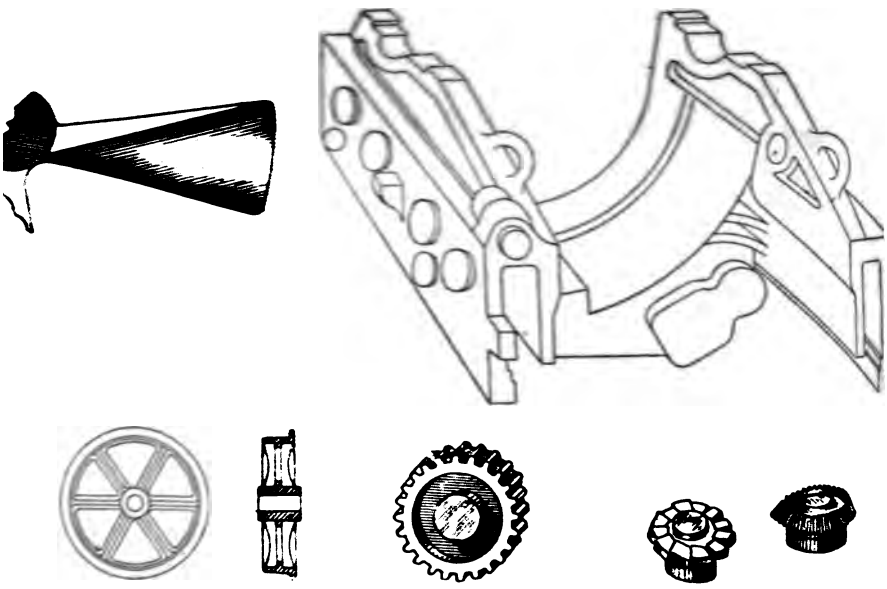


Fig. 163 à 167. — Types de pièces moulées en acier.

d'acier, il ne semble pas qu'on puisse se servir de pièces moulées pour résister indifféremment à tous les efforts.

C'est sous forme de *ferro-silicium* que le silicium est introduit dans le bain d'acier vers la fin de l'opération ; cette fonte spéciale utilisée

dans ce but particulier a une teneur en silicium voisine de 10 0/0 et une teneur en manganèse comprise entre 2 et 3 0/0.

Les premiers aciers sans soufflures furent d'abord obtenus avec une

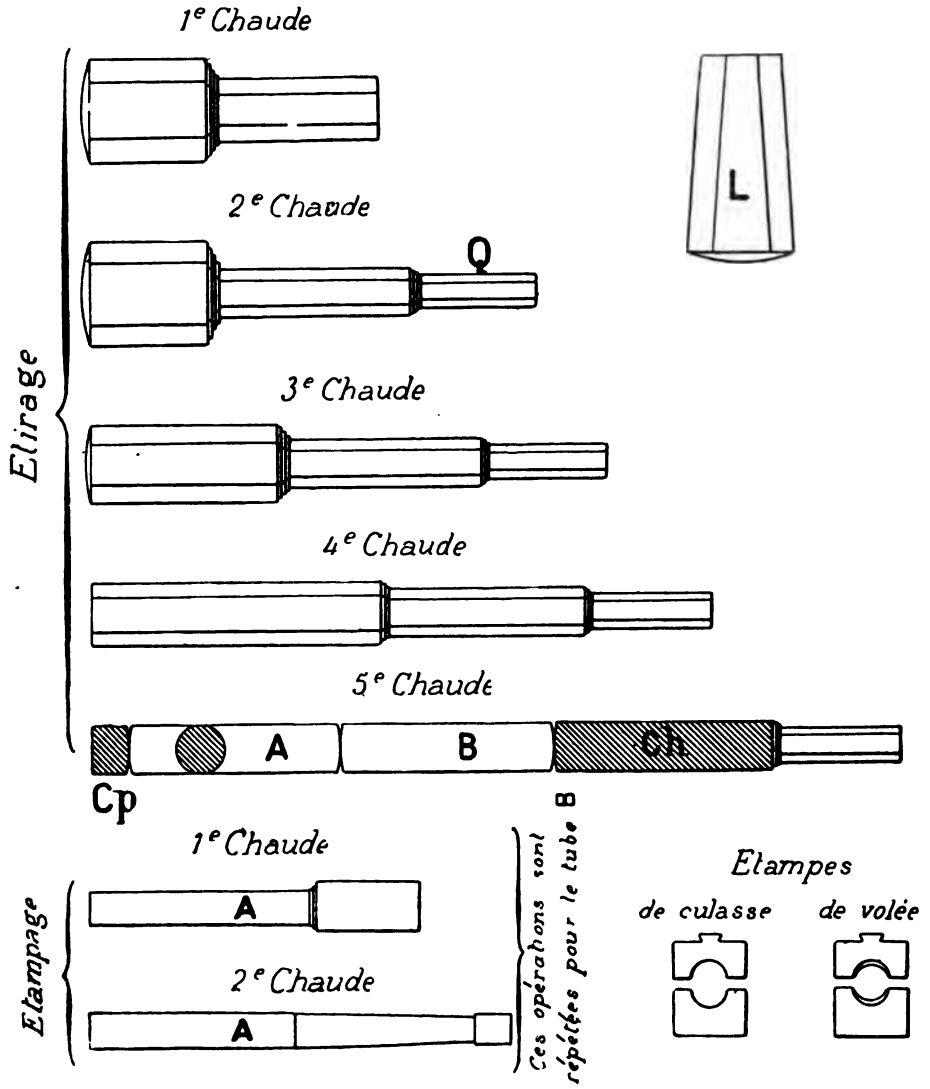


Fig. 168. — Forgeage. — Tube de canon, 90 mm. — Lingot pour deux tubes.

L, lingot de 3000 kilos pour deux tubes. — *Q*, Queue de griffage. — *Cp*, Chute du pied. — *Ch*, Chute du haut. — *A*, 1er tube.

simple addition de ferro-silicium ; plus tard on remarqua qu'on obtenait de meilleurs résultats par l'emploi simultané du ferro-manganèse et de

cette fonte siliceuse. L'acier produit était moins dur et plus ductile, mais il était néanmoins encore trop carburé et présentait, par suite, une partie des inconvénients qu'apporte une teneur assez forte en carbone.

Il était donc naturel de tenter la production d'un alliage qui renfermât à la fois le *manganèse* pour réduire l'oxyde de fer formé pendant l'élaboration de l'acier et le silicium pour calmer l'effervescence gazeuse occasionnant les soufflures. On pouvait espérer d'ailleurs que la quantité de carbone que l'on ajouterait ainsi serait moindre et que l'on pourrait obtenir des aciers plus doux. Dès lors, au lieu de deux additions : l'une, de fonte manganésée nécessaire comme on sait pour désoxyder le bain ; l'autre, de fonte siliceuse pour enlever les soufflures, l'opération n'en comportait plus qu'une remplissant les deux rôles. La fonte employée fut le *ferro-manganèse silicium* ou *silico-spiegel*.

Quand on veut obtenir aujourd'hui des aciers sans soufflures, en utilisant le silicium comme réactif, on se sert exclusivement de silico-spiegel.

Une très faible quantité *d'aluminium* ajoutée dans le récipient qui devra recevoir l'acier désoxydé ou non, selon le cas, par l'addition qui aura été effectuée dans l'appareil d'élaboration, assurera encore mieux l'élimination des soufflures : nous reviendrons sur ce point à propos de la fabrication des aciers au creuset.

L'aluminium (1) s'ajoute pur ou à l'état de ferro-aluminium ; nous avons déjà dit que la fabrication de l'aluminium ne rentrait pas dans le cadre de notre étude.

Pour avoir du ferro-aluminium nous avons indiqué qu'on pouvait faire dissoudre dans un bain d'acier ou de fonte de l'aluminium préparé d'autre part. M. l'Ingénieur de Billy cite d'après le *Stahl und Eisen* de juin 1896 le mode suivant :

Chauffer dans un creuset à revêtement basique, pendant un quart d'heure, de l'oxalate de fer, puis mélanger à l'oxyde de fer ainsi obtenu de l'aluminium, avec de la chaux et de la fluorine comme fondants ; après un chauffage assez prolongé on récupère un métal comprenant :

Carbone.	traces
Silicium.	3,5 à 3,55 0/0
Fer	56,70 à 56,80
Aluminium.	(non publié).

(1) La scorie consécutive à l'addition de l'aluminium est souvent peu fluide : Krupp substitue à ce métal une association de plusieurs métaux avides d'oxygène et de plusieurs éléments électro-négatifs (silicium et bore). Les silicates et borates sont très fusibles et viennent surnager à la surface du bain d'acier y formant une couche nettement séparée.

II. — *Addition de chrome.*

Le *chrome* donne aux aciers des propriétés très précieuses dont nous ne pouvons nous occuper ici. Pour l'introduire dans le métal, on se sert de *ferro-chrome* qu'on charge dans le bain vers la fin de l'opération et en général, quand la désoxydation par le charbon et par le ferro-manganèse a été accomplie. Il importe que l'atmosphère du four soit neutre ou réductrice et que le bain d'acier soit aussi peu riche que possible en oxygène.

A la température de fusion le chrome a une propension très grande à s'oxyder. Or, dans ce cas, il ne se forme pas comme avec l'oxyde de manganèse et la silice un silicate fusible et liquide, plus léger que l'acier, qui monte facilement à la surface; l'oxyde de chrome ou, d'après quelques auteurs, le chromite de fer formé reste incorporé avec tendance à prendre l'état pâteux.

On s'explique ainsi qu'une fonte notablement chromée ne puisse donner rien de bon au puddlage. En effet, chaque grumeau de métal affiné qui se forme s'entoure d'une pellicule oxydée adhérente et par suite insoudable, de sorte que sous le marteau cingleur il est impossible de réunir ces grumeaux en une loupe cohérente et propre.

Les ferrochromes étant en général très fortement carburés, il pourrait paraître naturel de songer à les employer à la place du ferro-manganèse pour recarburer un bain d'acier; or, on se heurterait dans cet emploi aux inconvénients de l'oxydation dont nous avons parlé.

M. *Brustlein* considère comme bien difficile de produire un acier extra-doux notablement chromé ayant de 1 à 2 millièmes de carbone. Il y aurait à cette production une double difficulté; d'abord les ferrochromes dont on dispose sont toujours très carburés et un alliage riche peu carburé ne serait plus fusible aux températures industrielles et serait excessivement oxydable.

En second lieu, l'acier obtenu à l'état de fusion deviendrait à la coulée plein de scories et de veines.

En résumé, les aciers chromés ne pourront être obtenus au *four Martin* qu'en un certain état de dureté en carbone et en admettant que l'oxydation y ait été réduite au minimum, soit par l'atmosphère du four, soit par la désoxydation plus ou moins complète de la scorie effectuée, si besoin est, par addition de coke très divisé.

On a pu cependant, d'après M. *Howe*, opérer autrement au four basique ; le carbone du bain étant amené au point voulu, on y ajoute assez de ferro-chrome pour obtenir la proportion de chrome que l'on désire en comptant sur une perte de 20 0/0 du chrome ajouté. Cette perte est paraît-il très constante. On n'ajoute ni Fe-Si, ni Fe-Mn ; le chrome empêcherait les soufflures, tout en désoxydant suffisamment le bain. Aussitôt le ferro-chrome fondu on procède à la coulée.

Il est vrai que M. *Howe* consent à une forte perte en chrome qu'il porte à un nombre encore plus élevé au *four acide*, puisqu'il nous affirme qu'il en passerait dans ce cas 80 0/0 à la scorie.

Il importe d'ajouter que les aciers chromés sont, en général, produits dans des creusets par un procédé que nous décrirons ultérieurement.

III. — *Addition de nickel ou de chrome et nickel.*

L'acier *nickel* se fabrique au four à sole acide ou basique sans difficulté spéciale. Le nickel plus ou moins pur est acheté directement par l'aciérie et ajouté à l'état de cubes ou de rondelles dans le bain d'acier vers la fin de l'opération. Il est bon de chauffer à la chaleur rouge dans un four voisin ces morceaux de nickel pour hâter leur fusion et ne pas trop refroidir le métal liquide.

Il n'y a, en somme, rien à changer dans le travail ordinaire ; le nickel introduit passe presque en totalité dans l'acier car il s'oxyde à peine.

On voit néanmoins combien s'agrandira l'échelle des aciers que peut fournir le four *Martin* ; car, tandis qu'avec le chrome on ne pouvait guère fabriquer que des aciers relativement riches en carbone, la teneur maxima en chrome ne dépassant guère 2 à 3 0 0, les teneurs en nickel peuvent varier de 0 à 25 0 0 et s'associer avec les diverses teneurs en carbone qu'on rencontre dans la série des nuances ordinaires d'aciers.

La durée de l'opération n'est pas modifiée, on termine au ferromanganèse comme d'habitude. L'acier obtenu est calme et ne monte pas dans les moules, il semble très homogène, se coule bien, est très fluide et se solidifie assez rapidement. Quand il est très chargé en nickel, il a tendance à avoir un fort retrait.

Les débris qui proviennent de la fabrication elle-même ou de l'élaboration ultérieure du métal peuvent se refondre sans déchet pour le

nickel qu'ils contiennent, ce qui a pour le remploi des vieilles matières de ce genre une importance sérieuse.

On peut aussi associer dans un même acier le chrome et le nickel, indépendamment du carbone qui y figure toujours en teneur variable.

Il n'y a qu'à effectuer concurremment avec une addition de nickel une addition de ferro-chrome à la richesse convenable.

On prétend même que le nickel diminuerait la tendance très grande que présente le chrome à l'oxydation et dont nous avons parlé plus haut.

Une remarque d'un grand intérêt doit être faite au sujet des aciers *chrome-nickel*, elle s'applique du reste à tous ces nouveaux aciers de la sidérurgie moderne dans lesquels entrent de si nombreux composants (1) :

Au point de vue absolu, il n'est pas possible de réaliser un bain homogène sur la sole d'un four *Martin* à cause des liquations que provoquent les variations de la température, même avec un acier dans lequel le carbone est l'élément primordial. Il semble que cet inconvénient ne peut que s'aggraver avec les aciers spéciaux, aussi voit-on certaines aciéries faire usage dans leur élaboration de mélangeurs mécaniques, en fer ou en bois de bouleau.

M. *Wedding* propose même le moyen suivant pour donner au bain d'acier l'homogénéité qui lui fait défaut : (de Billy, Revue des progrès de la Métallurgie).

Ajouter au bain de fer fondu un mélange composé du métal à y introduire, avec de la chaux et du coke ou du charbon de bois en poussier. La carburation s'effectue par une diffusion rapide du carbone dans toute la masse, produisant un mélange de ses différentes parties.

Cela dit, retenons que le nickel peut être incorporé à l'acier sans aucune difficulté, il faut cependant ajouter que pour qu'il puisse lui communiquer les propriétés spéciales dont l'étude sera faite dans la 2e partie de ce Traité, l'absence du soufre dans le bain d'acier est presque indispensable. La métallurgie du nickel ne peut offrir d'intérêt qu'autant qu'on traitera dans les appareils d'élaboration des fontes ayant été soumises à un traitement désulfurateur ; sinon, on incorpore-

(1) Dans la fabrication de tous les aciers où l'on incorpore du nickel il paraît démontré qu'une addition d'aluminium donne une grande homogénéité au métal ; par sa dissolution, l'aluminium agite violemment le bain d'acier et de nickel et facilite beaucoup une *union qui n'est pas très aisée* (M. Faucan, d'après le Dr Léo).

rait au métal, non plus du nickel, mais des sulfures dont les propriétés sont très nuisibles.

IV. — *Addition de manganèse.*

Quand on veut fabriquer des aciers particulièrement riches en manganèse, on mêle dans une poche de coulée du fer liquide décarburé au four *Martin* ou au *Bessemer* avec du ferro-manganèse d'une richesse convenable et en quantité telle que, même après désoxydation et recarburation, il reste assez de manganèse pour que l'acier en contienne à la dose recherchée.

Une addition aussi riche ne se fait pas dans le four lui-même afin de soustraire le métal manganésé à une oxydation trop rapide.

Article 6. — Au sujet de quelques nouvelles méthodes

Disons tout d'abord qu'il importe au plus haut point dans tout Traité didactique de ne pas attacher une importance trop grande aux nouveautés métallurgiques ; il faut laisser au temps le soin de faire son œuvre. Il y a loin de l'idée à sa réalisation pratique et industrielle. Aussi ne signalerons-nous que très rapidement les modifications les plus récentes offrant un assez sérieux intérêt.

Il semble que les efforts des métallurgistes tendent de plus en plus à la réalisation d'un métal pur en partant de matières premières quelconques au point de vue de la teneur en éléments nuisibles ou inutiles et en le fabriquant dans le minimum de temps. Pour y arriver, les inventeurs estiment que les matières impures doivent d'abord subir un traitement épurateur peu prolongé dans un premier appareil affineur où le laitier produit récupérera la plus grande partie des éléments nuisibles ou inutiles ; le métal épuré, séparé de son laitier et ainsi mis à l'abri des réactions subsidiaires qu'ils accompliraient l'un sur l'autre, est transvasé dans un nouvel appareil qui achèvera rapidement l'affinage.

A. — *Procédé Bertrand-Thiel.* — Les usines de Kladno (Bohême) possédaient 2 fours Martin, l'un de 12 et l'autre de 20 tonnes, qui avaient été construits à la suite l'un de l'autre, le second en contrebas du premier d'environ 3 mètres. Ce hasard de construction donna l'idée aux

inventeurs de charger dans le four supérieur la fonte riche en silicium et en phosphore en la traitant à l'ore process et de la couler dans le four inférieur recevant une charge pure dès que le laitier se serait formé dans le premier four.

Le four supérieur chargé le premier est fortement chauffé pendant 3 ou 4 heures, temps suffisant pour faire passer au laitier le silicium et la plus grande partie du phosphore.

Le four inférieur est chargé 2 ou 3 heures plus tard et quand ses matières supposées pures, traitées ou non à l'ore process, sont fondues, on déverse sur sa sole, après décrassage s'il y a lieu, le métal du four supérieur ; *mais en ayant soin de n'y pas laisser pénétrer le laitier riche en silicium et en phosphore* élaboré dans ce four. Ce laitier est retenu dans le chenal de coulée.

C'est après que le mélange des deux bains s'est effectué et que les réactions qui en résultent sont terminées qu'on procède à la coulée, après avoir toutefois ajouté *du spiegel*, ou *du ferro-manganèse*, etc.....

B. — *Procédé Stockman.* — Dans ce procédé, le premier appareil réalisant l'épuration est un convertisseur Bessemer à revêtement basique sur le fond duquel on a disposé un réactif composé de minerai de fer magnétique et titanifère et de nitrate de soude (1), le tout recouvert d'une mince feuille de tôle. La fonte liquide venant du haut-fourneau est versée dans ce convertisseur, la feuille de tôle est bientôt fondue et le réactif produit son action oxydante en formant un laitier qui surnage à la surface. On opère alors le décrassage et le métal épuré est versé sur la sole d'un four à puddler ou d'un four Martin où se termine l'affinage par une des variantes de travail spéciales à chacun de ces procédés.

Signalons en terminant que plusieurs usines essayent de hâter l'affinage sur la sole du four Martin en insufflant dans le métal par des tubes de 10 à 15 cm² de section un mélange d'air comprimé et de vapeur (Brevet Last et Wright).

(1) Ce procédé ne manque pas de ressemblance avec le procédé *Heaton* qui sera défini plus loin.

CHAPITRE III

APERÇU GÉNÉRAL SUR LES MÉTHODES D'ÉPURATION PRÉALABLE ET SUR LA DÉSULFURATION NOTAMMENT

Nous nous occuperons de la désulfuration par les sels alcalins et du traitement au cubilot *Rollet*, soit pour désulfurer, soit pour déphosphorer la fonte qu'on veut affiner par une méthode quelconque d'élaboration.

I. — *Désulfuration par les sels alcalins.*

Nous serons très bref sur les procédés dont nous allons donner le principe ; à notre avis, ce sont des essais de laboratoire plus ou moins judicieux mais que la pratique industrielle n'a pas sanctionnés d'une façon définitive.

1° *Procédé Heaton.* — Verser la fonte liquide venant du haut-fourneau ou d'un appareil de deuxième fusion (cubilot ou four à réverbère) sur du nitrate de soude. Ce nitrate de soude agit par oxydation.

2° *Procédé Warner.* — Verser la fonte liquide sur un mélange de calcaire en poudre, de carbonate de soude et d'autres matières oxydantes.

3° *Procédé Ball et Wingham.* — Faire agir sur la fonte liquide le cyanure de potassium, le carbonate de soude, les ferro-cyanures alcalins, la soude caustique, etc...

L'élimination du soufre par les méthodes précédentes n'est ni sûre, ni complète : en tout cas, l'usage de pareils réactifs onéreux ne paraît pas devoir être industriel.

Nous citerons encore un procédé datant de ces dernières années :

4° *Procédé Saniter.* — Il est particulièrement applicable au procédé d'élaboration d'acier sur sole basique sans rien changer à la manière ordinaire d'opérer, à part l'addition, une fois la fusion terminée, de 25 kilos de *chlorure de calcium* par tonne d'acier avec une quantité de chaux beaucoup plus considérable que celle qu'on emploie généralement. On n'est pas encore bien fixé sur la façon d'agir de ce réactif ; tout porte à croire que la désulfuration n'est due qu'à la chaux dont l'action est

rendue plus énergique par sa dissolution dans le chlorure de calcium son dissolvant par excellence, le soufre s'éliminant à l'état de sulfure de calcium. Nous ne pouvons prédire ce que l'avenir réserve à ce procédé qui n'a pas encore été l'objet d'un nombre suffisant d'expériences.

Nous terminerons par l'étude du procédé de désulfuration au cubilot *Rollet* qui a déjà fait ses preuves et auquel on peut donner le nom de procédé *vraiment industriel*. Et ce qui fait l'immense avantage de cet appareil, c'est qu'on peut opérer à son gré, moyennant certaines précautions toutefois, soit la désulfuration, soit la déphosphoration des fontes qu'on y refond.

II. — *Cubilot Rollet.*

M. *Rollet* (1), Ingénieur aux aciéries de Saint-Chamond (Loire) en 1882, présenta à cette époque, au Congrès d'Alais, une note relative à l'emploi du cubilot comme appareil épurateur des fontes. Ce procédé, appliqué d'abord aux usines de Givors, ne tarda pas à se répandre dans les usines de France et de l'étranger.

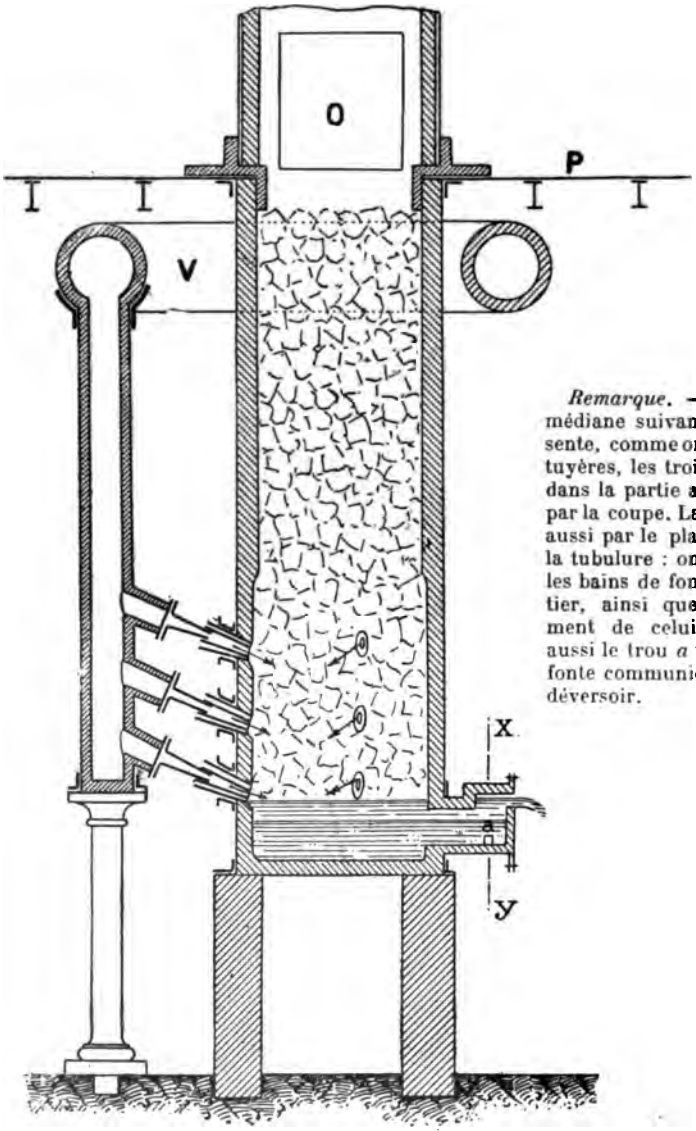
Cette méthode d'épuration, d'application difficile, ne pouvant être appliquée que par des Ingénieurs expérimentés, n'a pas eu certainement dans le monde métallurgique un retentissement comparable à celui des grandes inventions relatives à la déphosphoration dans les appareils affineurs proprement dits, mais elle a rendu les plus grands services aux usines qui cherchent surtout à fabriquer des métaux de premier choix. On se propose, en effet, dans cet appareil, d'éliminer le soufre et le phosphore des fontes de manière à obtenir des produits équivalents aux fontes de *Suède* ou aux anciennes fontes au *bois*.

Ces fontes seront traitées directement au four Martin ou soumises au puddlage, donnant des fers (fers Rollet) de qualité remarquable pouvant subir la cémentation (ce procédé sera bientôt décrit) ou bien être ajoutés à la fonte d'entrée du four Martin comme matière d'addition.

Nous ne savons pas si les usines à grande fabrication ont jamais songé à transvaser ces fontes directement du cubilot au four Martin; il est clair qu'on diminuerait considérablement les frais de transformation en opérant ainsi.

(1) Chimiste et Ingénieur métallurgiste du plus grand mérite. M. Rollet est mort il y a quelques années, à la suite des fatigues supportées dans le rude climat de la Russie où il allait vulgariser son procédé dans les nouvelles usines de ce pays.

Les fontes que l'on veut obtenir à un grand état de pureté doivent être traitées dans le cubilot, savoir :



Remarque. — La coupe médiane suivant *z v* représente, comme on le voit, six tuyères, les trois autres sont dans la partie avant enlevée par la coupe. La coupe passe aussi par le plan médian de la tubulure : on voit figurés les bains de fonte et de laitier, ainsi que le déversement de celui-ci. On voit aussi le trou *a* par lequel la fonte communique avec son déversoir.

Fig. 169. — Cubilot Rollet. — Figure schématique. — Coupe suivant *z v* passant par trois tuyères.

O, ouverture du gueulard. — *P*, plateforme de chargement. — *V*, conduite de vent chaud.

Une première fois par *oxydation* pour y être déphosphorées;

Une seconde fois dans *une atmosphère neutre ou réductrice* pour y re désulfurées.

A. — *Description de l'appareil.* — Cet appareil épurateur est un bilot à revêtement *basique*, il est à peu près cylindrique mais un peu

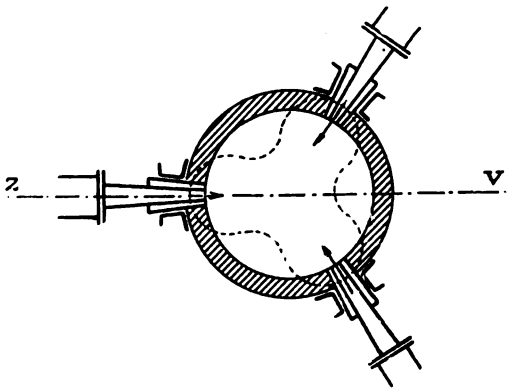


Fig. 170. — Coupe transversale passant par un rang de tuyères.

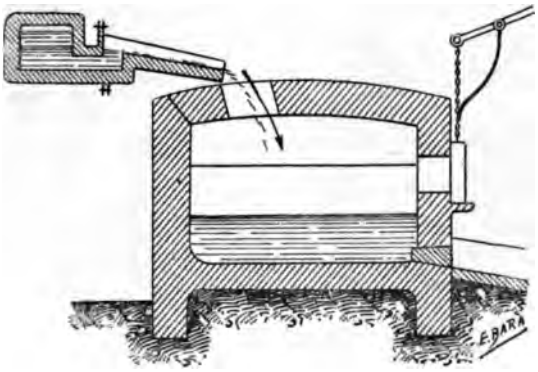


Fig. 171. — Coupe par $x\,y$ représentant le four réservoir.

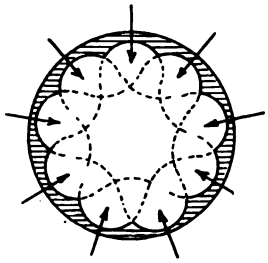


Fig. 172. — Schéma des accrochages.

as large dans le bas (1m10) que dans le haut; sa hauteur est de 5m50. Il est muni de trois rangs de tuyères qui se succèdent de 55 en 55 n. au-dessus l'une de l'autre, le premier rang étant à 60 cm. au-dessus de la sole. Le vent lancé par les neuf tuyères est à 500 ou 600° et une pression qui varie entre 3 et 5 cm. de mercure. Le cubilot ne comporte pas de creuset, les matières fondues qui tombent sur sa sole sont vacuées après leur arrivée et d'une façon continue par deux déversoirs,

l'un pour la fonte, l'autre pour les laitiers. La fonte coule dans un four à réverbère chauffé par une grille latérale, elle s'y rassemble et s'y conserve chaude : c'est de là qu'on l'extraira pour la couler sur l'aire. Une tuyère spéciale déverse les laitiers à l'extérieur.

Certaines usines ont modifié, souvent avantageusement, le dispositif ci-dessus concernant les déversoirs de fonte et de laitiers ; nous ne saurions en donner le détail. On peut imaginer aisément un mode convenable pour la récupération de la fonte produite, soit par déversement continu dans un récipient voisin, soit par remplissage d'un creuset suffisamment profond adapté à la partie inférieure du cubilot.

Le revêtement intérieur est constitué par des briques de magnésie ; il est donc basique. En cours de marche, cette matière ne tarde pas à être détruite ; c'est alors l'enveloppe en tôle du cubilot qui, énergiquement refroidie par un ruissellement d'eau continu, détermine la formation de garnissages métalliques (basiques, puisque ce sont des oxydes de fer) jouant le même rôle que le revêtement primitif.

L'étude théorique complète de la marche si difficile de cet appareil, ainsi qu'on va s'en rendre compte par notre aperçu général, n'a jamais été publiée, à notre connaissance du moins. Nous devons à M. *Boivin*, alors qu'il dirigeait à Firminy (Loire) les services du haut-fourneau et du puddlage, quelques précieux renseignements.

B. — *Marche en déphosphoration.* — Les agents employés sont : l'air chaud et le minerai. L'oxygène de ce minerai pur (minerai de Mokta, à 58 0/0 de fer et 1,8 0/0 de manganèse) brûle successivement les divers éléments de la fonte.

Une telle marche oxydante avec un excès de minerai ne peut être soutenue pendant longtemps, à cause du danger constant d'arriver à produire *des coups ferreux* dans le cubilot. La fonte est, en effet, soumise ainsi à un véritable mazéage et se transforme en une sorte d'acier sauvage très carburé (3 à 3,5 0/0 de carbone) n'ayant presque plus d'autres éléments étrangers.

Un pareil métal, à point de fusion relativement élevé par rapport à celui de la fonte, a tendance à se solidifier, donnant naissance à des accrochages sur lesquels viennent s'appuyer les matières du lit de fusion. Le chargement peut donc être arrêté dans sa descente et obstruer le cubilot.

En cours de marche, on remédiera à ce grave inconvénient en faisant

tourner les tuyères d'un certain angle de façon à ne plus les avoir sur trois génératrices verticales, mais sur des portions d'hélices parallèles. La figure (172) ci-dessus indique comment l'action des tuyères ainsi disposées détruit les accrochages qui s'organisent dans la paroi quand les tuyères sont placées sur les génératrices verticales.

On peut donc se rendre compte combien la marche du cubilot sera difficile à conduire pour déphosphorer ; il semble, par suite, qu'on n'ait pas pratiquement intérêt à se servir de cet appareil pour ce genre d'épuration. Comme il est facile d'y réaliser la désulfuration presque absolue, ne serait-il pas rationnel de s'en servir dans ce but, en coulant ensuite cette fonte exempte de soufre sur la sole basique d'un appareil affineur où se pratiquerait l'élimination du phosphore? Ajoutons cependant que la marche oxydante est parfaitement réalisable, mais elle exige d'une façon absolue que l'Ingénieur qui la dirige la surveille constamment, prêt à parer aux coups ferreux quand ils sont sur le point de se produire en agissant, soit sur les tuyères, soit sur la composition même du lit de fusion.

Voici, pour mémoire, un exemple de chargement du cubilot pour y opérer la déphosphoration :

Fonte à déphosphorer	*Silicium* . .	0,370 0/0	260 kilos.
	Manganèse. .	0,500 —	
	Phosphore. .	0,070 —	
	Soufre . . .	0.150 —	

Castine	30 kilos.
Spath fluor (destiné à donner aux laitiers une plus grande fluidité).	15 —
Minerai pur de fer (à 60 0/0 de fer environ). . . .	40 —
Vieux laitiers (servant de fondant).	10 —
Coke (à 6 0/0 de cendres)	50 —

Quant aux résultats obtenus, on trouve que la fonte est amenée après son passage au cubilot aux teneurs ci-dessous :

Silicium.	0,00 0/0
Manganèse.	0,00 —
Phosphore	0,01 —
Soufre	0,03 —

Le laitier, couleur café au lait et légèrement fusant, a environ la composition suivante :

Silice	12 à 13	0 0
Fluorure de calcium . .	15 à 17	—
Chaux	48 à 50	—
Magnésie	3 à 4	—
Alumine	3 à 4	—
Oxyde de fer	1 à 2	—
Oxyde de manganèse . .	2 à 3	—
Soufre	2,5 à 3	—
Acide phosphorique . . .	0,2 à 0,5	—

Le phosphore est éliminé à l'état de phosphate quadribasique de chaux ; quant à la composition même du laitier, elle est fort complexe.

C. — *Marche en désulfuration.* — Cette marche est facile, point n'est besoin de modifier la position des tuyères car l'allure réalisée est beaucoup plus neutre, même réductrice.

On marche *sans addition de minerai ;* par suite, pas d'oxydation générale. Le soufre s'élimine à l'état d'acide sulfureux et surtout à celui de sulfure métallique (sulfure de calcium principalement), grâce à la castine du lit de fusion.

La charge aura, par exemple, la composition de la fonte obtenue après l'opération précédente de déphosphoration :

Fonte déphosphorée	*Silicium* . .	0,00	400 kil.
	Manganèse .	0,00	
	Phosphore .	0,01	
	Soufre . .	0,03 et même plus	

On y ajoutera pour parfaire le lit de fusion :

Castine	35 kilos
Spath fluor.	20 —
Vieux laitiers	10 —
Coke (à 6 0 0 de cendres) . . .	50 —

Le soufre est réduit à une teneur que l'analyse ne décèle plus; quant au laitier, il a à peu près la même composition que dans la marche déphosphorante, à cela près qu'il est un peu plus riche en soufre.

D. — *Déphosphoration et désulfuration simultanées.* — Cette marche sera évidemment la plus difficile, puisque les conditions d'élimination du soufre et du phosphore sont contradictoires.

Très rarement employée aujourd'hui, elle était seule en usage autrefois lors des premiers essais du cubilot Rollet.

Par des variations appropriées dans la composition du lit de fusion, l'ingénieur devait chercher à se rendre maître de l'allure ; nous avons déjà dit quelle était la difficulté de cette opération, à cause du peu de fluidité de fontes rapidement désiliciées.

Dans une fonte à épurer contenant 0,249 0/0 de soufre et 0,945 0/0 de phosphore ; on a trouvé, après passage au cubilot, les teneurs suivantes en soufre et en phosphore :

$$S = 0{,}018\ 0/0$$
$$Ph = 0{,}07\ 0/0.$$

Quant aux laitiers ; leur composition varie, en général, dans les limites suivantes :

SiO^3	Al^2O^3	MnO	FeO	Fe^2O^3	CaO	MgO	S des sulfures	PhO^5	CaFl
De 16 à 50 0/0	De 1.10 à 1,50 0/0	De 2,5 0/0 à 1 0/0	De 0,40 à 0,30 0/0	Néant	De 55 à 58 0/0	De 1 à 2 0/0	De 1,5 à 2 0/0	De 0,5 à 0,8 0/0	De 11 à 14 0/0

TITRE V

PROCÉDÉ DE LA CÉMENTATION

ACIERS CORROYÉS — ACIERS FONDUS AU CREUSET

Principe du procédé.

Lorsqu'on veut épurer la fonte aussi complètement que possible il faut prolonger l'affinage presque jusqu'au fer doux, puis arriver à l'acier de nuance requise par une *recarburation* convenable : c'est ce qui se pratique dans les procédés *Bessemer* et *Martin-Siemens*. Comme cette *recarburation* accompagnant, comme on sait, la *désoxydation*, se fait par l'introduction *d'une fonte* dans le bain d'acier, on ramène toujours dans le produit final une partie des impuretés ou, si l'on veut, des corps étrangers que renferme la fonte.

Si donc on veut obtenir de *l'acier pur*, comme on disait autrefois, ou *de l'acier* dont les propriétés caractéristiques seront principalement dues au carbone, et c'est ce qu'il convient de dire aujourd'hui, on devra *recarburer avec le charbon proprement dit* ou des réactifs charbonneux purs ; c'est le principe de la *cémentation*.

Il y a cependant une différence essentielle dans la façon de procéder à la recarburation du métal : tandis que dans les procédés *Bessemer* et *Martin* on opère sur un métal fondu on cémentera sur un métal solide et porté à haute température.

De là, nécessité de fabriquer préalablement du fer par un autre procédé d'élaboration. Si donc ce fer est plus ou moins pur, l'acier cémenté qui en résultera le sera plus ou moins ; mais il est bien évident, et c'est ce qui justifie ce que nous avons dit plus haut, qu'en partant d'une fonte donnée, on aura toujours de l'acier plus pur en affinant cette fonte pour fer doux et cémentant ce dernier, qu'en affinant la même fonte directement pour acier.

Lorsque le fer sort de l'appareil où on l'a cémenté, sa constitution

changé à cause de l'incorporation du carbone qui s'est effectuée ; nous verrons plus loin que la répartition de ce corps dans sa masse est loin d'être régulière, aussi y a-t-il nécessité de donner au produit une certaine homogénéité. On y arrive par deux moyens : ou bien on soumet au *corroyage ou raffinage* les barres de fer cémentées en opérant comme pour les métaux puddlés, ou bien on casse ces barres en menus morceaux qu'on introduit dans des creusets *pour les faire fondre.*

Il en résulte qu'il y a lieu d'étudier d'abord la *cémentation proprement dite*, puis les procédés destinés à donner l'homogénéité au métal cémenté : *soit le raffinage ou le corroyage* et *la fusion au creuset.*

La cémentation est la plus ancienne des méthodes indirectes de fabrication de l'acier : l'historique de ce procédé est peu connu. Suivant *Beckman*, les anciens auteurs n'y font aucune allusion, mais il a été remarquablement décrit par *Réaumur* en 1722, dans son traité de l'art de convertir le fer en acier.

Si l'origine de la cémentation elle-même et de la transformation de l'acier cémenté qui en résulte en produit relativement homogène par voie de corroyage est peu connue, il n'en est pas de même du procédé consistant à fondre au creuset cet acier cémenté ; c'était le seul du reste qui jusqu'en 1856, permît d'obtenir l'acier à l'état liquide.

Nous reviendrons plus loin sur ce point spécial.

CHAPITRE Ier

LA CÉMENTATION

Nous ne passerons à la pratique du procédé qu'après avoir exposé les diverses théories établies à son sujet ainsi que les expériences exécutées afin de se rendre compte du mécanisme de la cémentation.

ARTICLE 1er. — EXPÉRIENCES ET THÉORIES CONCERNANT LA CÉMENTATION

I. — *Fait d'expérience.*

On peut carburer le fer de bien des manières différentes en faisant

agir sur lui le carbone pur, les charbons ordinaires, les carbures solides et, en général, toutes les substances végétales et animales. On peut se servir aussi de cyanures solides ou gazeux et de presque tous les gaz et vapeurs renfermant C, tels que CO et les nombreux hydrogènes carburés.

Toutes les fois que le fer est chauffé au rouge en présence de l'une quelconque de ces substances, il se carbure à la surface d'abord, puis graduellement jusqu'au centre. La quantité de C qu'il peut absorber peut aller jusqu'à 1,75 0 0.

Plusieurs chimistes ont essayé de se rendre compte du mécanisme par lequel s'opère la diffusion du C quand le fer reste solide, nous nous proposons d'exposer aussi succinctement que possible leurs théories et leurs expériences.

II. — *Théories et expériences.*

Leplay et *Laurent* (1836) ont admis la formation de vapeur de carbone.

C'est là une simple hypothèse en désaccord avec tous les autres faits.

Saunderson, *Schaffault*, *Binks* ont fait intervenir Az qu'on trouve, en effet, en petite quantité dans l'acier. Dans cet ordres d'idées, *Fremy* a regardé ce métal comme un azoto-carbure; mais *Boussingault* a montré que le même gaz se rencontre dans le fer et dans la fonte, la proportion y est quelquefois plus forte.

Le colonel *Caron* (1860) reprenant une théorie de *Gay-Lussac* a regardé les cyanures alcalins comme *l'agent indispensable* de la carburation.

Ses expériences, si elles étaient exactes, confirmeraient cette opinion; mais d'autres plus récentes font voir qu'il n'en est rien.

L'aciération peut, en effet, être produite par le C solide, ainsi que le croyaient *Guyton de Morveau* et l'allemand *Stammer* (1856).

Pour établir que C cémente le fer sans l'intervention d'aucun autre élément, il fallait opérer dans des vases imperméables aux gaz. M. *Margueritte* a placé dans un tube doublement vernissé une petite lame de fer doux s'appuyant sur les bords d'une nacelle de porcelaine et, sur le fer, un diamant. Avant de chauffer le tube, on y faisait passer pendant plusieurs heures H pur et sec, afin d'en chasser tout l'O qui aurait pu fournir CO. Après cela, on chauffa le tube pendant quelque temps et l'on

t l'appareil après refroidissement. La lame de fer était percée ıe à l'emporte-pièce et dans la nacelle on trouva un globule de fer ırré fondu.

ns une autre opération, on mit de la poudre de diamant dans la ıle en porcelaine, on y plaça l'une des extrémités d'un morceau de fer, puis on chauffa également au milieu d'une atmosphère d'H t sec. Le fer ne fut cémenté que dans la partie plongée au milieu poudre tandis que la partie extérieure n'était pas modifiée. On lonc rejeter la volatilité du C admise par *Laurent.*

ns une autre expérience le même chimiste a montré que CO pouıussi aciérer.

résumé, aucun corps n'a le monopole de la carburation; elle est ıite, comme nous l'avons dit au début, par les actions réunies du C ², des cyanures alcalins, de CO, des hydrocarbures, etc... La part ıarbon solide est même probablement prédominante, ainsi qu'il ,erait des expériences de *Boussingault* (1875) et de *Troost* et *feuille* (1876).

ɔutons que la cémentation a aussi pour effet d'éliminer une parı soufre (quelquefois les 4/5) contenu dans le fer traité. Peut-ɨ part-il à l'état de sulfure de C qui se décomposerait à peine ɨ; peut-être aussi, à cette température, ce corps volatil a-t-il moins nité pour le fer : c'est l'hypothèse qu'émet *Boussingault.*

Article 2. — Pratique de la cémentation

cémentation sert, soit à carburer des fers, soit à augmenter la ration d'aciers puddlés.

I. — *Constitution du four et du chargement.*

— *Description du four.* — L'opération s'effectue dans des caisses ıgulaires en terre réfractaire ayant généralement les dimensions ıtes : 4 mètres de long, 1 mètre de large et 1 mètre de haut.

caisses sont placées au nombre de deux dans un four en briques te surbaissée et dont la maçonnerie se prolonge verticalement en ɔrte de cheminée conique de 6 à 7 mètres de hauteur. Ce four ɛlle *four de cémentation.*

La durée totale de l'opération est de 20 à 30 jours environ, on ne ıit jamais plus de 15 opérations par an dans un même four.

III. — *Classification des produits.*

Les barres de fer qui étaient primitivement unies et lisses sont, au ›rtir des caisses de cémentation, couvertes d'ampoules à leur surface : e là, le nom d'*acier poule* qui est donné au métal.

Si ces ampoules sont trop grosses ou trop nombreuses, elles indiuent un fer mal soudé : elles sont dues au CO produit par la réaction es scories interposées dans le fer sur le carbone de l'acier.

Les barres sont devenues très fragiles et leur cassure présente des ıcettes lamelleuses d'autant plus grandes que le métal est plus carburé. n trempant une barre dans l'eau après l'avoir préalablement réchauf-:e, sa texture se modifie considérablement, la cassure devient grenue : brillante et la dureté augmente : c'est de l'acier.

Le maximum de carbone qu'on peut faire absorber au fer par ce pro-ɛdé est de 1,75 0/0 comme on l'a dit.

On pourra donc obtenir avec tous leurs intermédiaires les produits ıivants :

Fer en barres. . .	1 à 2	millièmes de	C
Acier doux	4 à 7	—	C
Acier dur.	10 à 12	—	C
Acier très dur . .	15	—	C

C'est uniquement par l'expérience que les fabricants se guident pour ɛgler la durée de l'opération : opérant toujours sur les mêmes matiè-ɛs ils arrivent à connaître, et la quantité de charbon, et le temps de ıauffage nécessaire, pour produire tel ou tel degré de carburation.

Autrefois, on se servait dans ce but de barres témoins, c'est-à-dire e barres de fer retirées de la caisse, qu'on examinait de temps en temps our juger de la marche de la cémentation. On y a renoncé à cause es courants d'air qui brûlaient une partie du cément et gênaient la égularité de la carburation.

L'acier *poule* est loin d'être homogène; la carburation, d'une part, 'est produite bien plus énergiquement à la surface que dans les parties entrales des barres et, d'autre part, dans une même barre, il y a de

grandes différences de carburation aux divers points de sa longueur.

Il faudra donc, dès que les barres seront sorties des caisses de cémentation, commencer par les briser en un certain nombre de morceaux, de façon à pouvoir, par l'examen de la cassure, apprécier la teneur en carbone et classer le métal. On forme ainsi des lots répartis en un certain nombre de numéros. Pendant cette classification on mettra de côté les *fers touchés*, (*c'est-à-dire les fers qui ont senti l'air par suite de fissures dans les caisses ou les couvercles*) ; ils se reconnaissent facilement à une pellicule ou liseré très brillant de fer brûlé (*cristallin et oxydé*) dans la cassure. On sépare aussi les *grains blancs* ou barres présentant dans leur cassure des grains de couleur blanc jaunâtre tranchant sur le gris bleuâtre des facettes : ces grains, provenant du métal mal affiné ou fonteux, se perpétueraient dans toutes les opérations ultérieures, même après fusion au creuset.

Il importe donc de donner à l'acier poule, par des opérations ultérieures, l'homogénéité qui lui manque. Ces opérations sont *le corroyage et la fusion au creuset.*

Nous ne dirons que quelques mots du corroyage nous réservant de traiter dans le chapitre suivant la fabrication de l'acier au creuset.

On peut appliquer au métal de chaque lot le procédé d'épuration par *corroyage.*

Avec les morceaux d'acier qui ont environ 40 cm. de longueur on forme un paquet ou trousse qu'on maintient avec des cercles en fer. Ce paquet est chauffé au *blanc soudant*, soudé alors au pilon ou au martinet et étiré ensuite sous forme de barre qui prend le nom *d'acier raffiné à 1 marque ou une fois corroyé.*

Si l'on veut accroître l'homogénéité du métal, on casse en deux la barre corroyée, on superpose les deux moitiés qu'on soude ensemble et qu'on étire de façon à obtenir une barre semblable à la première. Ce sera de *l'acier raffiné à 2 marques ou deux fois corroyé*, et ainsi de suite.

En pratique, on ne va jamais au delà de 3 corroyages pour les raisons que nous avons déjà données à propos du corroyage des aciers ou fers puddlés.

CHAPITRE II

ACIER FONDU AU CREUSET

ARTICLE Ier. — HISTORIQUE

à Benjamin *Huntsman*, horloger de *Doncaster*, mécontent des llemands peu homogènes qu'il employait dans son industrie, ıt redevable du premier acier fondu.

1770, *Huntsman* alla s'établir à *Altercliffe*, près de *Sheffield*, et, : nombreuses recherches, parvint à fixer sur des bases définitives :au procédé. La fabrication de l'acier fondu au creuset se dé- rapidement et ce fut à *Sheffield* qu'elle finit par s'implanter et :ctionner assez vite. On peut encore aujourd'hui considérer ce ıanufacturier comme un des plus importants de l'Angleterre au : vue de cette fabrication spéciale. *Sheffield* a gardé longtemps iorité, grâce à sa position exceptionnelle qui lui permettait de facilement les fers de *Suède* dont la qualité jusqu'à ces der- nnées n'avait pu être obtenue.

ance, ce procédé de fabrication fit son apparition assez tard. A d'avances faites par le gouvernement français à *James Jackson*, t d'acier à *Birmingham*, cet industriel débarquait à *Calais* en :tobre). Jusqu'à cette époque, la *France* avait été tributaire de *erre* pour l'acier fondu. Pendant les guerres du premier empire payé dans notre pays jusqu'à 12 francs une livre d'acier va- ·. 25 chez nos voisins.

: de très grandes difficultés, *Jackson* put louer, en Août 1815, la ı *Pêcheur* à *Trablaine* (Loire), petit hameau situé sur l'Ondaine ıe jeter dans la Loire avoir traversé *Firminy* : ce ruisseau servit : en mouvement les martinets de l'usine. L'emplacement sur *ackson* et ses fils édifièrent leur première usine s'appelle encore ier des *Anglais*.

ınt le cours de l'année 1816, on put fabriquer une quantité d'acier cémenté et fondu au creuset; la cémentation se faisait

avec des fers du *Dauphiné* et de l'*Ariège*, de la houille tirée des puits de la région et du charbon de bois de chêne.

Vers la même époque se fonda l'usine de la *Bérardière*, près de Saint-Etienne (Loire) ; cette usine essaya, mais en vain, d'employer pour la cémentation des fers indigènes.

Aujourd'hui, la fabrication des aciers fondus se fait principalement à *Unieux* (Loire), usine fondée par Jean *Holtzer*, ancien contrôleur d'armes de la manufacture de *Mutzig*, à *Assailly* (Loire), à *Firminy* (Loire), à *Montluçon* (Allier), à *Imphy* (Nièvre), au *Chambon-Feugerolles* (Loire), etc...

Les aciers fondus des aciéries *Holtzer à Unieux* jouissent d'une très grande réputation : les importants travaux de M. *Brustlein* ont beaucoup contribué à l'établir.

Les établissements précités fondent dans des creusets des fers puddlés provenant de fontes *Rollet* ou de fontes produites avec des minerais du *Dauphiné* ou des *Pyrénées*.

Pour les produits supérieurs, ils utilisent les fers au bois de Suède, etc...

Article 2. — Pratique du procédé.

Les variétés les plus importantes du procédé au creuset sont :

1°) Celle de *Huntsman ;* c'est la méthode primitive consistant à fondre de petits morceaux d'acier cémenté ou autre, fortement carburé, sans addition ou avec addition d'un fondant capable d'y faire du laitier : du verre, par exemple.

2°) Celle de *Marshall Heath*, où l'on ajoute du Mn réduit préalablement par chauffage de l'oxyde avec des matières carburées, ou réduit dans l'opération elle-même par l'action du charbon de bois sur l'oxyde de Mn.

3°) La méthode de *fonte* et *ferraille*, consistant à fondre du fer puddlé, de l'acier ou un mélange des deux en augmentant la proportion de C par une proportion plus grande de fonte.

4°) La méthode de la *fusion carburante*, dans laquelle on règle la teneur en C du produit par l'addition de matières carburées ; cette méthode est peu employée.

I. — *Des creusets.*

Les creusets sont en *graphite* ou en *argile;* ceux en graphite durent plus longtemps, demandent moins de précautions au moins au point de vue des changements de température, etc... mais ils cèdent plus aisément aux aciers, avec lesquels ils sont en contact à haute température, une notable partie de leur carbone et du silicium de l'argile qui est toujours plus ou moins incorporée dans leur pâte.

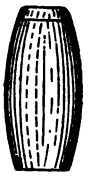


Fig. 176. — Creuset et son couvercle.

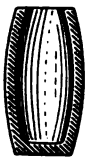


Fig. 177. — Coupe du creuset.

A. — *Creusets en graphite.* Ils se fabriquent à l'aide d'un mélange de graphite (50 0/0), d'argile réfractaire (45 0/0) et de sable (5 0/0); ces nombres sont approximatifs, bien entendu.

L'argile est transformée en pâte fine avec de l'eau ; le sable et le graphite finement pulvérisé lui sont ensuite incorporés. La masse ayant été abandonnée au pourrissage pendant quelques jours, on la découpe en morceaux dont la matière doit fournir celle d'un creuset.

Chaque morceau est *moulé au tour* et transformé en creuset.

Le creuset est séché puis soumis à une cuisson à haute température, soit dans un four spécial, soit même sur la sole d'un four *Siemens* (1200 à 1300°).

Les creusets en graphite renferment 25 à 40 kilogr. d'acier et sont généralement mis hors de service au bout de 6 à 8 coulées, selon la nuance de l'acier fabriqué.

B. — *Creusets en argile.* Les creusets d'argile sont très résistants à chaud mais deviennent très fragiles à froid : c'est pourquoi on les emploie d'une manière continue sans les laisser se refroidir, en les renvoyant au four chauffé au blanc aussitôt après la coulée, après les avoir bien examinés.

En raison de leur tendance à se fendre, sous l'effet des variations brusques de température en dessous du rouge vif, on les chauffe très lentement à leur première fusion. On incorpore toujours à l'argile une

certaine quantité de coke (5 0/0) hâtant le séchage et donnant au creuset une plus grande consistance à chaud.

Les creusets d'argile supportent généralement 4 à 5 coulées. Les matières premières ayant été pulvérisées et tamisées avec soin, on y mélange souvent des débris ou *écaillages* de vieux creusets. Après humectation et trituration de la pâte, soit par un pétrissage mécanique, soit par foulage au pied, on place un poids déterminé de cette pâte dans un moule en métal préalablement enduit d'une couche d'huile de lin. On chasse ensuite à force dans ce moule un noyau métallique guidé par une longue broche en fer traversant le fond du moule. Le noyau est enfoncé à la profondeur voulue pour laisser à la base du creuset une épaisseur convenable; on façonne ensuite la partie haute en tronc de cône après en avoir retiré le noyau :

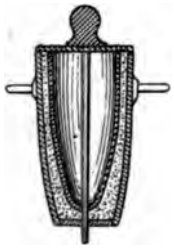


Fig. 178. — Moulage du creuset.

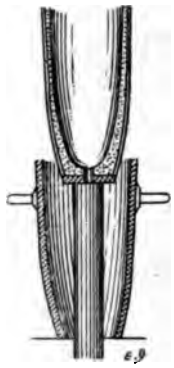


Fig. 179. — Extraction du creuset de son moule.

Le creuset est sorti du moule de la façon suivante.

Le tout est porté sur un axe de fer vertical; en agissant sur une pédale on soulève cet axe et les côtés du moule qui sont indépendants du fond peuvent être enlevés.

On laisse sécher le creuset pendant 24 heures, on bouche avec un rivet en terre l'ouverture du fond par laquelle passait l'axe centrant le noyau et l'on n'a plus qu'à cuire la pièce ainsi obtenue.

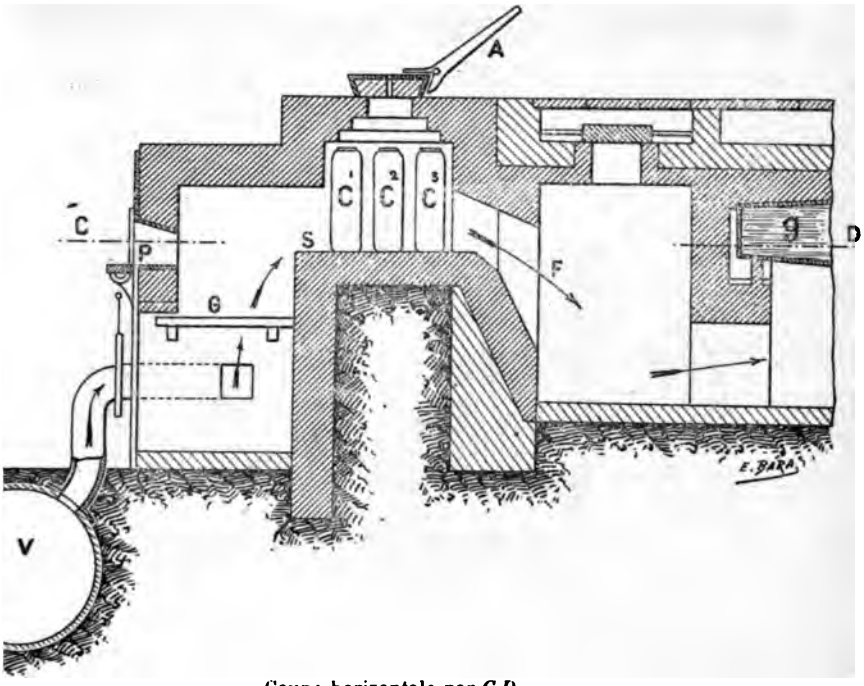
II. — *Du mode de chauffage.*

Les anciens fours à creuset étaient chauffés à l'aide de houille ou de coke brûlés sur une grille, ils étaient presque toujours à *vent soufflé*.

On utilisait souvent la chaleur abandonnée par les flammes perdues se rendant à la cheminée pour chauffer l'eau des chaudières des machines motrices.

On emploie aujourd'hui presque partout le chauffage au gaz, soit par le système *Ponsard*, soit surtout à l'aide de régénérateurs *Siemens* aux-

Coupe verticale par **AB**



Coupe horizontale par *C D*.

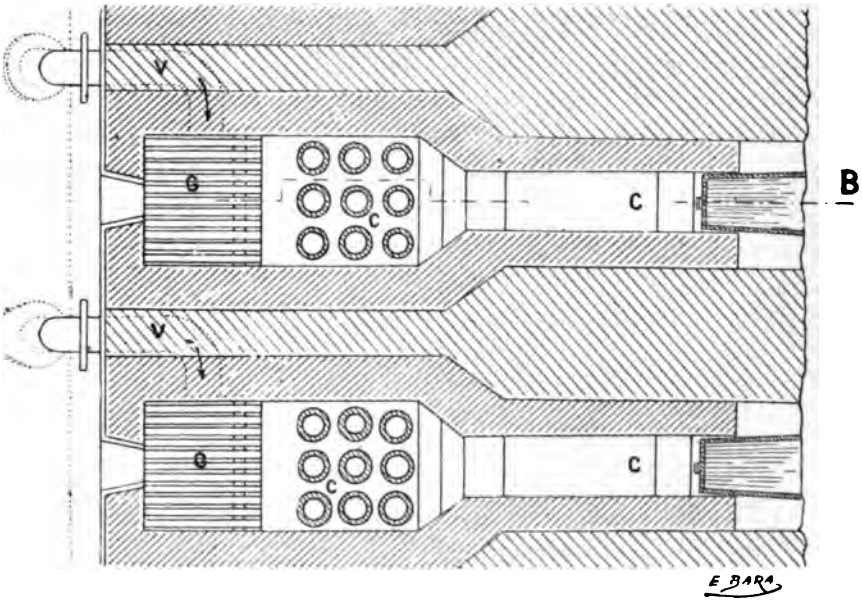


Fig. 180 et 181. — Four de fusion à la houille pour l'acier au creuset.

Couvercle obturant l'ouverture par laquelle on extrait les creusets — C_1 C_2 C_3, creu- — *F*, flammes perdues allant à la cheminée. — *G*, grille. — *g*, chaudière chauffée flammes perdues. — *P*, porte de chargement du combustible. — *S*, sole. — *V*, ite amenant le vent soufflé

, chaudières chauffées par les flammes perdues. — *c c*, creusets. — *G G*, grilles. *V*, vent soufflé.

quels le gaz est fourni par des gazogènes analogues à ceux que nous avons décrits lors de l'étude du procédé *Martin*.

Il y aurait donc lieu de replacer ici la plus grande partie des consi-

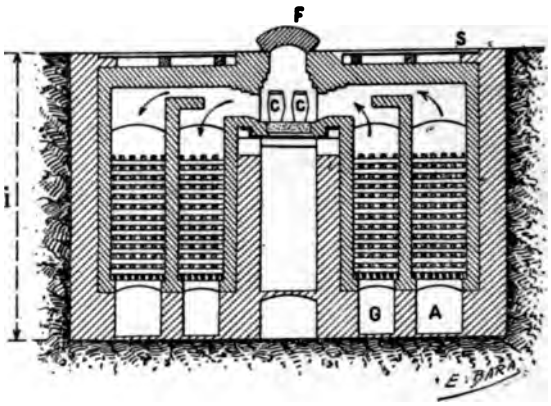


Fig. 182. — Four à creusets avec régénérateurs Siemens.

A, air. — *C C*, creusets. — *F*, voussoir de fermeture. — *G*, gaz. — *i*, infrastructure. — *S*, sol de l'usine.

dérations générales que nous avons exposées au sujet de l'installation de ce mode de chauffage.

Le chauffage au gaz a permis de réaliser les températures nécessaires pour la fusion de n'importe quel acier : à l'origine, on ne pouvait obtenir au creuset que des aciers de nuance relativement dure.

Les anciens fours à vent contenaient un nombre très limité de creusets, les fours *Siemens* actuels en contiennent d'ordinaire 18 à 24 sur deux rangs ; la figure précédente montre une coupe transversale du four à creusets perpendiculairement à sa longueur.

Le four *Nobel* est un four à combustible liquide, ce combustible est le pétrole.

Le *pétrole* est amené d'un réservoir supérieur par un tuyau et tombe sur une série de tablettes disposées en étagères à gradins. L'excès de pétrole non brûlé sur chacune d'entre elles tombe de tablette en tablette jusqu'à la partie inférieure du brûleur où un tuyau le prend pour l'envoyer dans le réservoir supérieur. L'air arrive en face des tablettes ainsi que par une ouverture supplémentaire à partir de laquelle il se chauffe entre les parois du four avant de contribuer à la combustion. Le four *Nobel* comprend trois chambres pouvant contenir chacune deux creusets.

C'est dans un four à pétrole que fut réalisée, il y a une douzaine ınnées, la fabrication d'acier doux exempt de soufflures à l'aide d'une ;s faible addition d'aluminium. Cet acier d'une très grande douceur

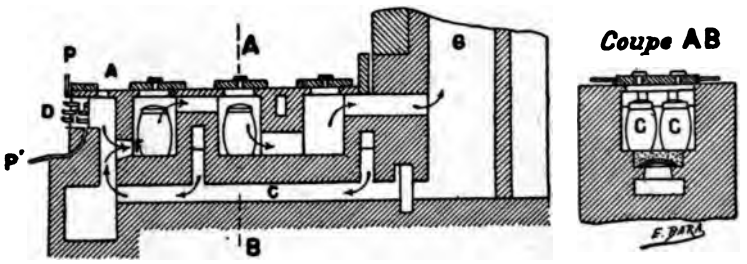


Fig. 183. — Four Nobel au pétrole.

A, arrivée de l'air. — *C*, arrivée supplémentaire d'air. — *CC*, creusets. — *D*, tablettes gradins. — *F*, arrivée de la flamme. — *G*, départ des gaz brûlés par la cheminée. *P*, arrivée du pétrole. — *P'* Ecoulement du pétrole en excès.

ıt appelé « *mitis* » et servit à confectionner des moulages : sa fluidité ait remarquable, il remplissait bien les moules et donnait des objets une grande compacité.

Les diverses théories émises au sujet du rôle joué par l'aluminium ıns cette fabrication, ainsi que l'historique de la question, seront traités ans le « *Travail des métaux* ».

III. — *Coulée du métal.*

Selon la dureté de l'acier, la fusion dure de 4 à 8 heures. Quand elle st effectuée, les ouvriers équipés de pantalons et de blouses en treillis u'ils mouillent abondamment, enlèvent successivement les couvercles u four et retirent rapidement chaque creuset à l'aide de tenailles spéiales. Le creuset rempli pèse environ 50 kilos ; c'est là le poids maxiıum qu'un homme peut manœuvrer à bout de bras.

Dans certaines aciéries au creuset, on trouve des dispositifs mécaniues de défournement ; il ne paraît pas que ces appareils aient tenance à se généraliser, sans doute à cause de la résistance opposée ar les ouvriers eux-mêmes à une innovation tendant à diminuer la nain-d'œuvre.

Les hommes employés à ce travail de défournement sont choisis armi les plus grands et les plus vigoureux. Si la tâche à remplir est noins longue qu'au puddlage, elle n'en est pas moins souvent pénible

à cause des variations énormes de température auxquelles ces habiles ouvriers sont soumis dans un temps assez court.

Quand un creuset est défourné le couvercle est enlevé, on l'écume en enlevant à l'aide d'un ringard en fer le peu de scorie visqueuse qui surnage l'acier; puis, comme le métal liquide ne remplit plus qu'une partie de la capacité du creuset, on verse son contenu dans le creuset voisin, soit pour diminuer le nombre des transports à la poche de coulée, soit pour rendre l'acier plus homogène s'il est destiné à être coulé dans de petites lingotières, etc...

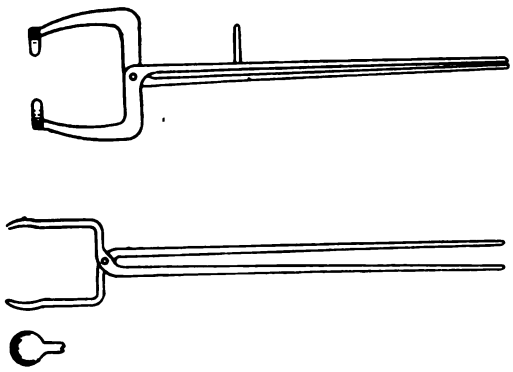


Fig. 184. — Types de tenailles à défourner.

On laisse toujours l'acier au repos dans les creusets avant de le couler, car il laisse dégager une certaine quantité de gaz : l'acier devient alors *tranquille*, ce repos donné à l'acier a été appelé le *Killing* (to kill-tuer).

Quand on veut couler de gros lingots au creuset, il faut que l'acier

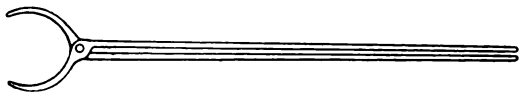


Fig. 185. — Tenaille à coulée

soit versé dans la lingotière d'une façon continue et que le métal co

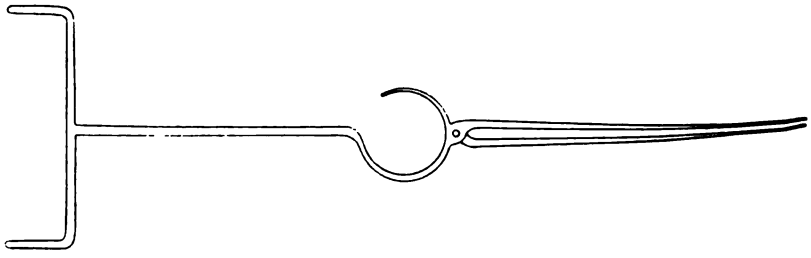


Fig. 186. — Tenaille de coulée pour forts creusets.

tenu dans les différents creusets ait la même température. Cette

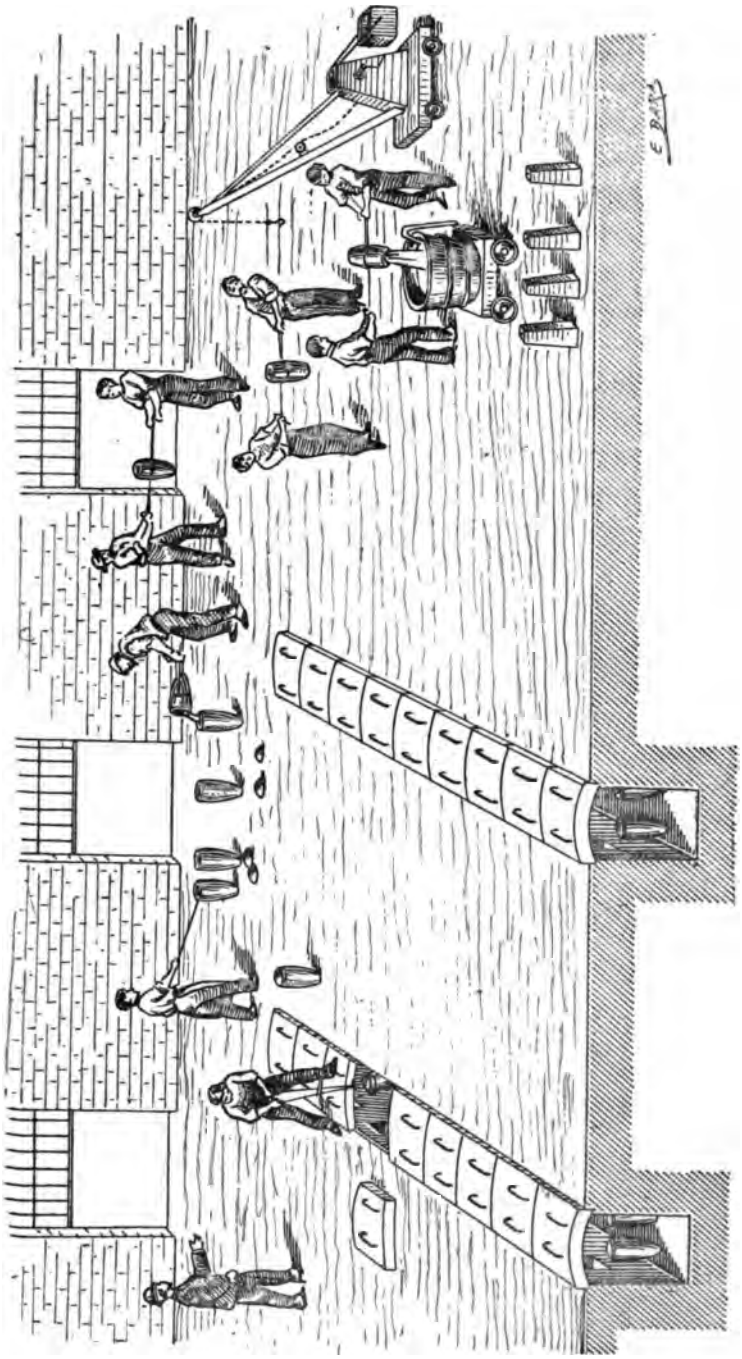


Fig. 187.

deuxième condition est difficile à réaliser quand on verse successivement chaque creuset dans la lingotière parce que la coulée peut alors durer assez longtemps. Aussi, généralement, commence-t-on par réunir dans une poche de fonderie les charges des creusets ; on conçoit que si l'on a réglé convenablement la durée de l'extraction des creusets, celle du *killing* et du transport à la poche, l'acier puisse être versé à température à peu près constante dans la lingotière et sans aucune discontinuité.

On peut aussi réunir toutes les charges des creusets dans un four à réverbère *Siemens* à atmosphère neutre et procéder ensuite à la coulée.

IV. — *Valeur du procédé et produits obtenus.*

Le procédé au creuset est incomparablement plus coûteux que les procédés *Bessemer* et sur *sole*, tant au point de vue des matières premières qu'on y emploie qu'à celui du prix de leur transformation, de la main-d'œuvre, etc...

Mais, d'un autre côté, ses produits sont considérés et avec raison, comme bien supérieurs à ceux des autres procédés, même à composition chimique égale.

Le creuset étant un récipient fermé, il n'y aura pas d'oxydation notable comme dans toutes les autres méthodes d'élaboration et, par suite pas d'affinage proprement dit. On trouvera fondues, en fin d'opération toutes les matières du chargement initial, à une faible quantité de scorie près, et *sans interposition d'oxyde de fer.*

Le prix de cet acier limite ses applications à la production des aciers de choix destinés aux outils tranchants, aux ressorts, etc... ; cependant, on s'en sert aussi pour de fortes pièces : canons, frettes, arbres de transmission, etc... lorsque la qualité du métal est un facteur essentiel à assurer.

Les aciers dits *spéciaux*, lorsqu'on ne veut pas les obtenir en très grandes masses, se fabriquent surtout au creuset. Le vrai procédé industriel pour les obtenir consiste à fondre avec de l'acier cémenté une proportion convenable d'une fonte spéciale apportant l'élément que l'on veut introduire.

Ce sera un *ferro-chrome*, un *ferro-tungstène* ou simplement du *Wolfram*, etc...

L'acier *manganèse* ne se prépare pas dans les creusets, comme on l'a déjà dit, à cause de l'attaque rapide des parois par le métal riche en manganèse ; on se contente de verser l'acier au carbone préparé à la nuance requise dans la poche de coulée où l'on aura préalablement placé la quantité de Fe-Mn voulue.

CONCLUSION

Nous avons terminé l'étude des procédés d'élaboration des métaux rreux, soit la première partie de notre Traité.

Ainsi qu'on l'a dit au début de ce travail, il a été reconnu impossi- e de réunir dans un même appareil la *réduction* et l'*affinage oxydant.* faut donc, en l'état actuel de l'art sidérurgique, pour produire le fer les diverses nuances d'acier, deux appareils bien distincts dans leurs Fets :

L'un de fusion réductive, c'est le *haut-fourneau* produisant la fonte;

L'autre, où s'accomplira l'affinage, et qui pourra être :

Le four à puddler		Produisant les fers et aciers puddlés ou les fers et les aciers fondus.
Le four Martin . .	acide ou basique.	
La cornue Bessemer		
Le creuset.		

Cependant, quelques métallurgistes ont pensé, et l'idée est certaine- ent séduisante, qu'au lieu de fondre les minerais au haut-fourneau a incorporant au produit fondu, par le fait même de l'opération, une uantité notable de corps à éliminer ultérieurement, il vaudrait mieux s réduire simplement à l'état d'*éponges douces* ou d'*éponges carburées ;* a un mot, réaliser le *direct process.*

La suppression du haut-fourneau est une conception à laquelle sont nus se heurter déjà bien des esprits ; nous ne saurions prédire ici : que l'avenir réserve à ces essais souvent renouvelés, surtout de l'autre té de l'Atlantique.

En France, nous devons citer M. *Chenot* père qui s'occupa le premier e cette question et poursuivit ses recherches jusqu'à sa mort. Son fils s continua sans être plus heureux dans les résultats.

L'appareil *Chenot* se composait d'une cornue prismatique en briques

réfractaires à parois à peu près verticales et s'évasant légèrement par le bas pour faciliter la descente des charges. Ces cornues étaient réunies deux par deux de manière à former un massif sensiblement carré. On opérait, en somme, dans ces appareils, à l'aide de minerai riche, une fusion réductive en même temps qu'une oxydation d'après le procédé primitif.

Malgré l'insuccès des tentatives de MM. *Chenot* père et fils, le même principe fut appliqué en *Amérique*, en 1873, par l'ingénieur *Blair*; la forme cylindrique adoptée pour les cornues les rendait plus solides et facilitait la descente des éponges métalliques.

Pour le chauffage on utilisait, soit un foyer à la houille, soit un foyer à gaz, tant pour l'appareil *Chenot* que pour l'appareil *Blair*.

On mêlait au minerai 20 0/0 d'anthracite; l'éponge réduite arrivait au bas de l'appareil pour y recevoir un bon coup de feu final destiné à fondre les matières, à oxyder la masse et à souder les particules métalliques.

Dans un autre ordre d'idées, mais avec un succès sans cesse grandissant, nous devons signaler les progrès considérables réalisés par les procédés de fusion électrique. Le four de M. *Moissan* constitue à cet égard un appareil remarquable.

Des creusets destinés à la fusion électrique de la fonte et de l'acier sont déjà entrés en pratique courante dans quelques aciéries.

L'électricité deviendrait-elle bientôt un nouvel agent sidérurgique? L'avenir nous l'apprendra.

TABLE DES MATIÈRES

DU TOME I

ant-propos 1
tions préliminaires. — Définitions. — Historique. — Agents métallurgiques. 3
Article 1er. — Définitions 3
Article 2. — Historique 9
Article 3. — Agents métallurgiques 13
I. — Les minerais. 13
A. — Minerais de fer proprement dits 13
B. — Propriétés générales des minerais de fer 14
C. — Minerais spéciaux. 15
a) Minerais de manganèse 15
b) Minerais de chrome 15
c) Minerais de tungstène 16
d) Minerais de nickel 16
e) Minerais de silicium 16
D. — Généralités sur le traitement préliminaire des minerais. . 16
II. — Les combustibles 18
A. — Notions générales sur les combustibles. 18
B. — Description des combustibles. 20
C. — Fabrication du coke. 30
Article 4. — Etude théorique élémentaire de la combustion. . . . 46
I. — Pour dégager d'un combustible le maximum de chaleur, il faut d'abord que la combustion soit complète. 46
§ 1°) *Définitions* 46
A. — Combustion complète 46
B. — Pouvoir calorifique. 47
C. — Température de combustion 48
§ 2°) *Il n'est pas aisé de réaliser une combustion complète avec un combustible solide*. 48
A. — La combustion n'est pas comparable d'un point à un autre. 49

B. — Les divers éléments d'un combustible solide n'exigent pas tous les mêmes conditions pour une combustion complète. Il y a des pertes forcées. 50
C. — Le comburant et les éléments combustibles n'auront pas toujours la température nécessaire pour réagir les uns sur les autres 51
§ 3°) *Pourquoi la combustion de combustibles gazeux sera-t-elle plus parfaite.* 51
A. — Il est possible avec les gaz de régler la quantité d'air nécessaire à la combustion complète et de multiplier les points ou surfaces de contact du gaz et de l'air comburant . . . 52
B. — Les gaz pourront être chauffés au préalable 53
C. — Enfin, on pourra développer une chaleur d'autant plus intense que l'air et les gaz combustibles auront été portés à une température plus élevée avant leur combustion . . . 53
II. — La température de la combustion croîtra avec la chaleur apportée séparément par le comburant et par le combustible lors de la combustion 53
§ 1°) *De l'hypothèse nécessaire pour établir la valeur de la température de combustion* 53
A. — Calcul de la température de la combustion en supposant le combustible et l'agent comburant à 0°. 54
B. — Que devient la valeur de t quand le combustible et le comburant sont à une température supérieure à zéro. . . 55
III. — Expériences et lois relatives au pouvoir calorifique. . . . 56
§ 1°) *Expériences de MM. Favre, Silbermann et Berthelot* . 57
§ 2°) *Lois relatives au pouvoir calorifique* 58
A. — Lois générales. 59
B. — Loi de Dulong. 59
C. — Loi de Welter. 60

TITRE I. — LE HAUT-FOURNEAU

FABRICATION DE LA FONTE

Définitions 62
CHAPITRE Ier. — RÉACTIONS DU HAUT-FOURNEAU 64
Article 1. — Généralités sur le haut-fourneau 64
A. — Description sommaire du haut-fourneau 64
B. — Chargement du haut-fourneau 65
C. — Alimentation d'air 67

Article 2. — Théorie de la réduction. 70
A. — Des agents réducteurs. 71
B. — Etude du phénomène de réduction dans le haut-fourneau . 74
Article 3. — Théorie de la formation des laitiers 83
I. — Laitiers à silice, alumine et chaux 84
A. — Fusibilité des laitiers. 84
B. — Propriétés des laitiers. 86
II. — Laitiers à silice, alumine, chaux et autres bases multiples . 86
III. — Désulfuration et déphosphoration ou passage du soufre et du phosphore aux laitiers 89
A. — Désulfuration 89
B. — Déphosphoration 91
IAPITRE II. — CLASSIFICATION DES FONTES. 93
Article 1. — Les fontes ordinaires 93
I. — Les fontes d'après l'aspect de leur cassure 93
A. — Définitions. 93
B. — Causes déterminant la précipitation du graphite . . . 96
C. — Des allures du haut-fourneau. 100
II. — Les fontes au point de vue de leur emploi 104
Article 2. — Les fontes spéciales 107
I. — Le ferro-manganèse. 108
A. — Définition des ferro-manganèses 108
B. — Teneur en carbone ou en autres corps des ferro-manganèses 109
C. — Des principaux composés manganésés 110
D. — Principes généraux de fabrication 111
E. — Historique de la fabrication. 114
II. — Le ferro-silicium. 115
A. — Définition des ferro-silicium 115
B. — Principes généraux de fabrication 115
C. — Historique de la fabrication. 116
III. — Le silico-spiegel ou ferro-manganèse-silicium 117
A. — Définition du silico-spiegel. 117
B. — Principes généraux de fabrication 118
IV. — Digression sur la métallurgie du silicium 119
V. — Le ferro-chrome 120
A. — Historique de l'utilisation du chrome en sidérurgie. . 120
B. — Propriétés du ferro-chrome 122
C. — Principes généraux de fabrication 124
VI. — Autres fontes spéciales 125
VII. — Exemples de composition de fontes spéciales 127

A. — Ferro-manganèse 127
B. — Ferro-silicium et silico-spiegel. 128
C. — Ferro-chrome. 128
D. — Fontes nickelifères 128
Article 3. — Les fontes au bois 129
CHAPITRE III. — ORGANISATION DU HAUT-FOURNEAU ET DE SES ACCESSOIRES 130
Article 1. — Construction du haut-fourneau 131
I. — La cuve 131
A. — Cuve proprement dite 131
B. — La chemise 132
C. — Cuve sans chemise 132
II. — Supports de la cuve et de la chemise 133
III. — Les étalages, l'ouvrage et le creuset 135
A. — Etalages 135
B. — Ouvrages 135
C. — Creuset 135
IV. — Refroidissement des parois. 140
V. — Des creusets en fer 143
A. — Les briques n'étant presque pas conductrices, la corrosion n'est pas limitée 143
B. — Avec un creuset métallique, la corrosion est très vite limitée 144
C. — Description du creuset. 144
VI. — Examen critique des diverses dimensions des hauts-fourneaux . . . . . 14[illegible]
A. — Hauteur . . . . . 14[illegible]
B. — Diamètre de l'ouvrage . . . . . 14[illegible]
C. — Diamètre du gueulard . . . . . 14[illegible]
D. — Forme de la cuve 148
E. — Volume du haut-fourneau. 148
Article 2. — Les appareils à air chaud 149
I. — Appareils en fonte 150
II. — Appareils en briques 151
A. — Notions générales 151
B. — Les appareils Cowper et Whitwell 153
Article 3. — Perfectionnements apportés aux appareils en briques. 157
I. — Appareils Cowper 157
II. — Appareils Whitwell. 161
Article 4. — Appareils de fermeture et de chargement 164
I. — Notions générales 164
A. — Du chargement 164

B. — Organes du chargement 167
II. — Description des appareils 167
A. — Cup and cone 168
B. — Appareils à prise centrale 169
rticle 5. — Les machines soufflantes et leurs chaudières, etc... . 172
I. — Machines soufflantes. 172
II. — Chaudières des machines soufflantes 174
III. — Autres machines 177
rticle 6. — Utilisation des sous-produits 177
A. — Ciments de laitiers 177
B. — Briques de laitiers 178
C. — Sous-produits des gaz 178
PITRE IV. — NOTES COMPLÉMENTAIRES. 178
Note A. — Étude du bilan calorifique du haut-fourneau . . . 179
Note B. — Centres de production des fontes en France. . . . 182

TITRE II. — LE FOUR A PUDDLER

FABRICATION DES MÉTAUX MISÉS OU SOUDÉS

liminaires. — Notions générales sur l'affinage 185
I. — Qu'est-ce que l'affinage. 185
II. — Les agents oxydants 186
III. — Produits de l'oxydation 186
IV. — Mécanisme de l'affinage par oxydation 187
APITRE Ier. — PROCÉDÉS D'ÉLABORATION PRODUISANT LE MÉTAL A L'ÉTAT PATEUX 189
rticle 1er. — Aperçu général 189
rticle 2. — Affinage au bas-foyer 190
A. — Appréciation du procédé 190
B. — Description du foyer 191
C. — Du finage ou mazéage précédant l'affinage de la fonte au bas-foyer 193
rticle 3. — Affinage au four à reverbère ou puddlage 194
APITRE II. — PRATIQUE DU PUDDLAGE 199
rticle 1er. — Marche générale d'une opération de puddlage . . . 200
A. — Chargement et fusion 200
B. — Brassage 201
C. — Confection des loupes 203
D. — Transformation de la loupe en fer brut 204

Article 2. — Puddlage mécanique. 208
A. — Procédé Lemut 208
B. — Procédé Espinasse 210
C. — Four Bouvard 210
D. — Four Pernot 214
Article 3. — Comment puddlera-t-on pour avoir des fers ou des aciers 217
A. — Puddler pour fer à grains ou pour aciers 217
B. — Puddler pour fer nerveux ou pour fer doux 220
C. — Digression sur le corroyage 221
Article 4 — Perfectionnements récents apportés au four à puddler. 222
A. — Four de puddlage au gaz, système Siemens 223
B. — id. système Ponsard 225
C. — Puddlage direct au gaz, système Bonehill 227
D. — Conclusion sur le puddlage au gaz 227

TITRE III. — FABRICATION DES FERS ET ACIERS FONDUS

PROCÉDÉ BESSEMER

Principe du procédé 229
CHAPITRE Ier. — BESSEMER ACIDE 231
Article 1er. — Historique du procédé 231
Article 2. — Convertisseur et usine Bessemer 235
I. — Le convertisseur Bessemer 235
A. — Convertisseur proprement dit 235
B. — Boîte à vent et tuyères. 236
C. — Fonds mobiles 236
II. — Usine Bessemer. 238
Article 3. — Marche d'une opération jusqu'à l'arrêt 243
I. — Période de scorification. 244
II. — id. de décarburation 244
III. — id. des fumées 245
Article 4. — Du réactif employé pour désoxyder le bain 246
A. — Les explications de M. Valton 246
B. — Pratique de l'addition de manganèse 249
C. — De la teneur en certains éléments des spiegels et des ferro-manganèses 251
Article 5. — Détermination du point d'arrêt 253
Article 6. — Bilan chimique et calorifique du procédé Bessemer. . 256
CHAPITRE II. — BESSEMER BASIQUE OU PROCÉDÉ THOMAS ET GILCHRIST. 264

Article 1er. — Notions générales sur la déphosphoration 264
I. — Essais de déphosphoration au convertisseur Bessemer . . . 265
II. — La déphosphoration est réalisée 266
Article 2. — Théorie de la déphosphoration au convertisseur . . . 267
I. — Les combustibles intermoléculaires. 267
II. Succession des combustions intermoléculaires 269
A. — Combustion du silicium 269
B. — id. du carbone 271
C. — id. du phosphore 273
D. — id. du soufre 276
Article 3. — Pratique de l'opération. 277
I. - La cornue. 277
A. — Caractéristiques de la cornue basique 277
B. — Historique du garnissage 278
C. — Variétés de garnissages 279
II. — Détails de l'opération industrielle 281
A. — Additions calcaires. 281
B. — Point d'arrêt 282
C. — Décrassage et additions finales 282
Article 4. — Minerais phosphoreux et laitiers basiques. 284
I. — Les minerais phosphoreux 284
II. — Les laitiers basiques 286
IAPITRE III. — LES PETITS CONVERTISSEURS 287
I. - Appareil Clapp et Griffiths 287
II. — Convertisseur Robert 289
III. — Procédé Walrand-Légénisel 291

TITRE IV. — FABRICATION DES FERS ET ACIERS FONDUS

PROCÉDÉ MARTIN SIEMENS

éliminaires. 293
I. — Principe du procédé 293
A. — Scrap process 293
B. — Ore process 294
II. — Historique du procédé. 295
IAPITRE I. — ETUDE PRATIQUE DU FOUR MARTIN-SIEMENS 298
Article 1. — Le gazogène 298
I. — Gazogènes à grille (type Siemens). 298
A. — Description du gazogène 298

B. — Décrassage et conduite du gazogène 301
II. — Gazogènes à vent soufflé 302
A. — Gazogènes à grille soufflés 302
B. — Gazogènes à cuve. 303
III. — Le gaz à l'eau 305
IV. — Dispositions générales des gazogènes 306
A — Groupement des gazogènes. 306
B. — Tirage des gazogènes 307
Article 2. — Régénérateurs Siemens 309
I. — Fonctionnement des régénérateurs 309
II. — Eléments des régénérateurs 312
III. — Disposition des briques 316
IV. — Disposition des brûleurs. 317
V. — Valves de renversement 320
Article 3. — Four Biedermann et Harvey 324
A. — Description du nouveau four Siemens. 325
B. — Fonctionnement de l'appareil 326
C. — Critique du four Biedermann et Harvey 326
D. — De l'emploi de l'acide carbonique comme gazéifiant . . . 327
Article 4. — Le four Martin proprement dit 328
I. — Le laboratoire 328
II. — La sole 330
III. — La voûte. 331
IV. — Type Batho avec brûleurs Hackney 332
CHAPITRE II. — L'ÉLABORATION DE L'ACIER MARTIN-SEMENS 334
Article 1. — Scrap process 334
I. — Nature des approvisionnements. 335
II. — Marche d'une opération 336
A. — Fusion des matières. 336
B. — Détermination du point d'arrêt 338
C. — L'addition finale et la coulée 339
D. — Filtration de l'acier 340
Article 2. — Ore process 343
I. — Méthode de travail 343
II. — Succession des opérations avant la coulée 344
III. — Théorie du procédé 344
Article 3. — Emploi des loupes. 346
Article 4. — Marche en déphosphoration. 346
I. — Considérations générales 346
II. — Matériaux de revêtement 347
III. — Marche de l'opération 350

A. — Nécessité d'une haute température 350
B. — Variantes de travail. 350
C. — Sur l'élimination du soufre 352
D. — Nature des produits obtenus. 353
Article 5. — Des additions faites en vue d'un but spécial 355
I. — Addition de silicium 355
II. — id. de chrome. 359
III.— id. de nickel ou de chrome et nickel. 360
VI.— id. de manganèse. 362
Article 6. — Au sujet de quelques nouvelles méthodes 362
A. — Procédé Bertrand-Thiel 362
B. — Procédé Stockman. 363
HAPITRE III. — APERÇU GÉNÉRAL SUR LES MÉTHODES D'ÉPURATION PRÉALABLE ET SUR LA DÉSULFURATION NOTAMMENT 364
I. — Désulfuration par les sels alcalins 364
II. — Cubilot Rollet 365
A. — Description de l'appareil. 367
B. — Marche en déphosphoration 368
C. — Marche en désulfuration 370
D. — Déphosphoration et désulfuration simultanées 371

TITRE V. — PROCÉDÉ DE LA CÉMENTATION

ACIERS CORROYÉS — ACIERS FONDUS AU CREUSET

·incipe du procédé. 372
HAPITRE I. — LA CÉMENTATION 373
Article 1. — Expériences et théories concernant la cémentation . . 373
I. — Fait d'expérience 373
II. — Théories et expériences 374
Article 2. — Pratique de la cémentation 375
I. — Constitution du four et du chargement 375
A. — Description du four. 375
B. — Choix du métal et chargement 376
II. — Conduite de l'opération 378
III. — Classification des produits 379
HAPITRE II. — ACIER FONDU AU CREUSET 381
Article 1er. — Historique 381
Article 2. — Pratique du procédé 382

I. — Des creusets 383
A. — Creusets en graphite 383
B. — Creusets en argile 383
II. — Du mode de chauffage 384
III. — Coulée du métal 387
IV. — Valeur du procédé et produits obtenus 390

Conclusion. 393

DIJON. — IMPRIMERIE DARANTIERE

NOV 1 7 1938